

Resum

El projecte presenta l'estudi d'un parc eòlic marí des d'un punt de vista elèctric. S'estudia l'anàlisi dinàmica del control *droop* emprat en les xarxes d'alta tensió en corrent continu HVDC (*High Voltage Direct Current*) que interconnecten els parcs eòlics marins amb la xarxa elèctrica terrestre principal.

Per dur a terme l'estudi, s'han seleccionat els diferents elements que componen aquest tipus de sistema, incloent el seu enllaç amb la banda de xarxa elèctrica i amb la banda de l'aerogenerador. Mitjançant el programari *Matlab Simulink®* i amb l'ajut de la llibreria *Simscape*, s'han pogut dur a terme les simulacions necessàries per poder comprovar el correcte funcionament del sistema.

Val a dir que s'estudien una configuració punt a punt, una configuració de tres terminals i, finalment, una de quatre terminals HVDC. L'objectiu és valorar l'efecte de la potència generada pels parcs eòlics en les respostes transitòries i estacionàries dels diferents corrents i tensions.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	7
1.1. Símbols	7
1.2. Superíndexs	8
1.3. Acrònims	9
2. PREFACI	11
3. INTRODUCCIÓ	13
3.1. Objectius del projecte	13
3.2. Abast del projecte	14
4. GENERACIÓ I TRANSMISSIÓ DE L'ENERGIA ELÈCTRICA	17
4.1. L'aparició de les primeres xarxes	17
4.2. Les fonts d'energia renovables i la seva creixent rellevància	18
4.3. Parcs eòlics marins	18
5. SISTEMES DE TRANSMISSIÓ HVDC	21
5.1. Convertidors LCC-HVDC i VSC-HVDC	21
5.2. Configuracions usals en les transmissions HVDC	22
5.2.1. Configuració <i>Punt a punt</i>	22
5.2.2. Configuració <i>Back to back</i>	23
5.2.3. Configuració <i>Multiterminal</i>	23
5.3. Comparació entre les transmissions AC i DC	23
6. DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA UTILITZAT	27
6.1. La xarxa multiterminal global	27
6.2. La xarxa d'interconnexió entre els diferents sistemes	27
6.3. Els convertidors VSC del sistema	28
6.4. El convertidor VSC per la banda de l'aerogenerador	28
6.5. El convertidor VSC per la banda de la xarxa elèctrica terrestre	28
7. MODELITZACIÓ DE LA XARXA HVDC	30
7.1. Modelització del convertidor VSC-HVDC	30
7.2. Modelització de la xarxa elèctrica terrestre	31
7.3. Modelització de la xarxa del parc eòlic marí	32

7.4. Modelització dels cables HVDC.....	32
8. CONTROL DE LA XARXA HVDC	35
8.1. Convertidor VSC a la banda de la xarxa de corrent altern	35
8.1.1. Reference computation o Llaç de tensió	36
8.1.1.1. Equacions del Reference computation o Llaç de tensió	38
8.1.1.1.1..... Controlador PI	38
8.1.1.1.2..... Bloc potència-intensitat	38
8.1.2. Control <i>Droop</i>	38
8.1.2.1. Equacions del control <i>Droop</i>	39
8.1.3. Reference computation i control droop	39
8.1.4. Current loop o Llaç de corrent.....	39
8.1.5. Equacions del Current loop o Llaç de corrent	41
8.1.6. Voltage modulation	42
8.1.7. PLL o Phase locked loop	42
8.1.7.1. Equacions del PLL o Phase locked loop	42
9. SIMULACIÓ	45
9.1. Paràmetres utilitzats	45
9.1.1. Justificació dels paràmetres utilitzats	46
9.2. Control del VSC per la banda de la xarxa elèctrica terrestre	47
9.3. Control del VSC per la banda dels aerogeneradors	49
9.4. Simulació de la configuració punt a punt	51
9.4.1. Variables d'entrada	51
9.4.2. Resultats de la simulació punt a punt.....	52
9.5. Configuració multiterminal 1	58
9.5.1. Variables d'entrada	58
9.5.2. Resultats de la simulació multiterminal 1	59
9.6. Configuració multiterminal 2	61
61	
9.6.1. Variables d'entrada	61
9.6.2. Resultats de la simulació multiterminal 2	62
CONCLUSIONS	65
AGRAÏMENTS	67
10. ANNEX A. PRESSUPOST	69
10.1. Recursos humans	69

10.2. Recursos informàtics	69
10.3. Pressupost global	70
11. ANNEX B. IMPACTE AMBIENTAL	72
11.1. Estudi previ d'impacte	72
11.1.1. Impacte sobre zones de pesca i navegació	72
11.1.2. Impacte sobre l'ecosistema marí.....	72
11.1.3. Impacte sobre el paisatge	72
11.2. Construcció i funcionament del parc eòlic	73
11.3. Desmantellament del parc eòlic	74
12. ANNEX C. TRANSFORMACIÓ DE PARK	76
12.1. Equacions i matriu de la transformació de Park	77
12.2. Teoria de la potència instantània en el marc d'una referència síncrona	77
13. ANNEX D. TRANSFORMACIÓ DE CLARK	80
BIBLIOGRAFIA	82

1. Glossari

1.1. Símbols

C és la capacitat pròpia del condensador

E és la tensió del bus de continua en el terminal on actua el control *droop*

E_{DC} és la tensió a la banda de corrent continu del convertidor VSC (banda xarxa elèctrica)

E_{DC}^* és la tensió desitjada en corrent continu del convertidor VSC (banda xarxa elèctrica)

E_m és el valor màxim del pic de voltatge admès per la xarxa elèctrica

E_{wf} és la tensió a la banda de corrent continu del convertidor VSC (banda parc eòlic)

E_0 és la tensió de referència del control *droop*

i^* és el corrent que s'obté del control *droop*

i_d és la component d en referència $qd0$ del corrent que circula pel convertidor VSC

I_{DC} és el corrent a la banda de corrent continu del convertidor VSC (banda xarxa elèctrica)

I_{DCI} és la intensitat que circula a la banda de corrent continu del convertidor VSC

i_q és la component q en referència $qd0$ del corrent que circula pel convertidor VSC

i_q^* és el corrent q en referència $qd0$ desitjat al convertidor VSC (banda xarxa elèctrica)

I_{wf} és el corrent a la banda de corrent continu del convertidor VSC (banda parc eòlic)

K_{droop} la constant *droop*, que és la base del control *droop*

K_{iPLL} és la constant integradora temps del PLL

K_{iRC} és la constant integradora del reference computation

K_{pPLL} és la constant proporcional del PLL

K_{pRC} és la constant proporcional del reference computation

l_l és la inductància d'acoblament

P^* és la potència activa total, amb condensador, que s'hauria de subministrar al VSC (banda xarxa)

P_{AC} és la potència activa a la banda de corrent altern del convertidor VSC

P_C és la potència que emmagatzema el condensador

P_{DC} és la potència activa mesurada abans del condensadors del VSC (banda xarxa)

P_{DC}^* és la potència activa, sense condensador, que s'hauria de subministrar al VSC (banda xarxa)

Q_z^* potència reactiva desitjada al convertidor VSC (banda xarxa elèctrica)

r_l és la resistència d'acoblament

v_{ld} és la component d en referència $qd0$ de la tensió del convertidor VSC

v_{lq} és la component q en referència $qd0$ de la tensió del convertidor VSC

V_{pic} és la tensió de pic de la xarxa elèctrica terrestre

V_{peakwf} és la tensió de pic a la banda de l'aerogenerador

v_{zabc} és la tensió en referència abc de la xarxa elèctrica terrestre

v_{zq} és la component q en referència $qd0$ de la tensió de la xarxa d'alterna

θ és l'angle de la xarxa elèctrica terrestre

\emptyset és l'angle de desfasament de la tensió de la xarxa elèctrica terrestre

ξ_{RC} és el *damping ratio* desitjat en el llaç de tensió

ω_e és la velocitat angular de la xarxa elèctrica terrestre

ω_{RC} és la velocitat angular en el llaç de tensió

τ és la constant de temps en bucle tancat del sistema elèctric

τ_{PLL} és la constant de temps del *PLL*

1.2. Superíndexs

abc En referència d'un sistema trifàsic

qd0 En referència dels eixos qd0

1.3. Acrònims

AC Corrent Altern

BTB Back to back

CSC Current Source Converter

DC Corrent Continu

GSVSC Grid Source Voltage Source Converter

HVAC High Voltage Alternating Current

HVDC High Voltage Direct Current

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

IMC Internal Model Control

LCC Line Commutated Converter

PI Controlador amb part proporcional i part integradora

PLL Phase Locked Loop

RC Reference computation

PWM Modulació per amplada de pols

SVPWM Space Vector Pulse Width Modulation

UHV Ultra High Voltage

VSC Voltage Source Converter

WF Wind farm o parc eòlic

WFVSC Wind Farm Voltage Source Converter

2. Prefaci

La motivació d'aquest projecte rau en l'ús, cada vegada més freqüent, de la tecnologia HVDC per transmetre energia enlloc de la tecnologia HVAC (*High Voltage Altern Current*). Una de les aplicacions més conegudes i estudiades en l'actualitat és el transport de la potència generada per parcs eòlics marins situats a grans distàncies de la xarxa elèctrica terrestre.

És evident que els parcs eòlics es poden construir *onshore*, en indrets amb superfícies extenses on poder ubicar els aerogeneradors. Però són també coneguts els problemes tècnics de transport viari i de muntatge d'aquestes infraestructures, així com les dificultats burocràtiques que s'han de superar durant la licitació de l'obra. Per aquest motiu, els parcs eòlics marins guanyen importància i cada vegada són més els països que decideixen destinar nombrosos recursos a la construcció d'aerogeneradors al mar.

A més de la reducció dels inconvenients ja esmentats, existeixen interessants avantatges pel que fa a la construcció *offshore* (al mar). Per una banda, es redueix l'impacte visual perquè els parcs eòlics marins se situen a desenes (o centenars) de quilòmetres lluny la costa. Per altra banda, la velocitat del vent al mar es manté més uniforme que no pas a la superfície terrestre, degut a l'eliminació d'obstacles físics, ja siguin naturals o creats per l'home.

Cal destacar que existeixen altres aplicacions on la transmissió d'energia en corrent continu (HVDC) és també molt útil. Per exemple, en la interconnexió de diversos parcs amb diferents punts de la xarxa terrestre, aconseguint-se crear una gran xarxa que connecti la major part dels països europeus amb explotacions d'energia renovable a gran escala, ja siguin parcs eòlics marins o energia fotovoltaica generada en deserts, entre d'altres.

3. Introducció

En aquest apartat introductori se situarà al lector per tal que tingui clara l'estructura de l'estudi que es durà a terme. A més, s'explicaran detalladament els objectius fixats inicialment i l'abast del projecte.

En el capítol 4, es descriu la manera com la xarxa elèctrica terrestre ha anat evolucionant al llarg dels últims temps. També s'hi exposa el creixent interès pels sistemes generadors d'energia renovables i es presta atenció als parcs eòlics marins.

En el capítol 5, s'analitzen la tipologia de convertidors que permeten les connexions HVDC, així com les diferents configuracions existents entre ells i s'explica la diferència entre la transmissió HVDC i HVAC.

En el capítol 6, es duu a terme una descripció del sistema. En el capítol 7, s'explica la modelització de tots els elements que conformen el sistema. En el capítol 8, es detalla el control de cada element del sistema. Finalment, en el capítol 9, es duen a terme les diferents simulacions per comprovar que el model estudiat és correcte i per poder extreure'n conclusions.

3.1. Objectius del projecte

Una vegada finalitzat aquest projecte, es pretenen haver assolit els següents objectius:

- Estudiar i escollir els elements que confeccionaran el parc eòlic marí i l'enllaç HVDC amb la xarxa terrestre.
- Modelitzar la xarxa interna del parc eòlic i els elements que la conformen.
- Modelitzar diferents configuracions per a l'enllaç HVDC.
- Dissenyar els controls del convertidors de les diferents configuracions d'enllaç HVDC.
- Desenvolupar un model amb la llibreria *Simscape* del programari *Matlab Simulink®* que permeti analitzar cada element del sistema individualment.
- Realitzar diverses simulacions del model.
- Comprovar que el comportament del model en les simulacions és l'esperat.

3.2. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte inclou l'estudi, l'anàlisi i l'elecció dels elements que configuren el sistema HVDC, és a dir, la xarxa elèctrica dels parcs eòlics marins, la xarxa elèctrica terrestre principal, els convertidors VSC (*voltage source converter*) a cada banda i els enllaços HVDC entre les diferents estacions convertidores *offshore* i *onshore*. També pertany a l'abast d'aquest treball la modelització dels elements exposats així com el seu control per tal que siguin estables i mostrin el comportament desitjat.

Per dur a terme la modelització i el control es disposarà del software Matlab Simulink®, i de la seva llibreria Simscape. També forma part de l'abast d'aquest mateix projecte aprendre a desenvolupar models i programes mitjançant el programari mencionat.

4. Generació i transmissió de l'energia elèctrica

4.1. L'aparició de les primeres xarxes

Durant molt de temps, la indústria de l'energia elèctrica es va considerar un sector econòmic madur i estable, el qual oferia un bon servei sense necessitat d'innovar gaire. Però en les últimes dècades la situació ha canviat dràsticament gràcies a un fort procés de desenvolupament i innovació. Existeix un interès, cada vegada més arrelat en la societat, per tal d'aconseguir un subministrament d'energia elèctrica que sigui més barata i neta. Així, s'estan duent a terme grans avenços pel que fa a la generació d'aquesta energia, així com en els sistemes encarregats de transportar-la. Grans inversions han sigut, són i seran necessàries per modernitzar i fer més flexible la xarxa elèctrica terrestre.

La indústria energètica s'ha mantingut en constant evolució al llarg del segle XX. Per exemple, els sistemes més antics consistien en un simple generador connectat a una o diverses càrregues properes. La companyia encarregada de la generació elèctrica era també la propietària d'aquest generador i de la xarxa on es connectaven les càrregues. Per tal d'augmentar la fiabilitat en el subministrament, així com per poder donar resposta a una creixent demanda d'energia elèctrica, aquestes xarxes locals varen començar a enllaçar-se entre elles, formant una xarxa interconnectada. A mesura que augmentava el nombre de càrregues dependents d'una mateixa xarxa, augmentava també la necessitat de que aquesta estigués més interconnectada amb d'altres, fent que l'energia total generada creixés i, per tant, s'haguessin d'emprar nivells de tensió més alts. Poc a poc, països sencers van electrificar-se, creant-se enormes xarxes de transmissió d'energia [1].

A nivell estatal, la consolidació de les companyies energètiques provocà que, a la dècada dels anys 90, tots els països europeus tinguessin com a mínim una o més empreses verticalment integrades, cadascuna responsable de l'abastiment en la zona pertanyent al seu rang d'actuació. Aquestes companyies s'encarregaven tant de la generació com de la distribució de l'electricitat. En altres paraules, les tasques que lideraven tenien a veure amb la planificació, operació, manteniment i explotació del sistema de transmissió i de les plantes de generació d'energia. Normalment, aquestes empreses eren propietat de l'estat o si més no, estaven sota el seu control. Aquest sistema d'organització vertical segueix vigent en gran part dels països arreu del món.

4.2. Les fonts d'energia renovables i la seva creixent rellevància

La societat d'avui en dia mostra una creixent consciència sobre la petjada ambiental de l'espècie humana. Especialment, es consideren problemàtics els gasos d'efecte hivernacle que contribueixen a l'escalfament global del planeta. La generació d'electricitat a partir de combustibles fòssils, contribueix a augmentar la contaminació atmosfèrica, llançant-hi CO₂. Actualment, s'intenten reemplaçar les fonts d'energia contaminants per d'altres d'energia renovables. Europa es va convertir en una ferma defensora del desenvolupament de les energies renovables per a la generació d'electricitat mitjançant la publicació d'una directiva per augmentar la producció d'energies renovables del 14% al 22% entre 1997 i 2010 [2]. El gener de 2008, una nova directiva fou proposada i adoptada per la Comissió Europea, on es van establir objectius vinculants per als països membres en els anomenats objectius 20-20-20 [3]:

- Reduir en un 20% les emissions de gasos d'efecte hivernacle a la UE, respecte dels nivells del 1990.
- Augmentar fins un mínim del 20% la quota de consum d'energia a la UE produïda a partir de recursos renovables.
- Millorar un 20% l'eficiència energètica de la UE.

De manera relacionada amb els objectius 2020, i com a continuació pels esforços destinats a l'increment de l'ús de les energies renovables en el subministrament d'energia, es preveu que un 27% del consum elèctric sigui generat a partir de fonts renovables l'any 2030 [4].

4.3. Parcs eòlics marins

L'interès en acomplir els objectius mencionats i la pressió exercida per part de la societat han fet desenvolupar noves estratègies per tal d'obtenir energia elèctrica sense necessitat d'utilitzar fonts d'energia no renovables.

Així, s'ha pensat en traslladar els parcs eòlics terrestres al mar. D'aquesta manera, s'aconsegueix una generació més uniforme ja que la velocitat del vent al mar és molt més constant que a la superfície terrestre. Conseqüentment, també s'elimina la contaminació visual que un parc eòlic terrestre pot ocasionar a la població.

Actualment, existeixen multitud de parcs eòlics *offshore*, que generen grans quantitats d'energia, la qual s'ha de transmetre a la xarxa elèctrica terrestre. Tot i que al capítol 5 es detallarà amb més precisió, val a dir que aquesta transmissió es realitza en HVDC perquè

presenta més avantatges respecte una transmissió HVAC, com per exemple una reducció en les pèrdues de l'energia transferida.

A la taula 1 es presenten alguns dels parcs eòlics marins europeus més importants que treballen amb transmissions HVDC, detallant-se la potència que generen cadascun d'ells, la tensió continua a la qual transmeten l'energia generada i la longitud total de cables d'alta tensió que els uneix a la costa més propera.

Taula 1 Parcs eòlics marins amb transmissió HVDC

Parc eòlic marí	Potència generada [MW]	Tensió continua [kV]	Longitud cables [km]
BorWin1	400	300	200
BorWin2	800	600	200
BorWin3	900	640	160
DolWin1	800	640	165
DolWin2	900	640	135
DolWin3	900	640	160
HelWin1	576	500	130
HelWin2	690	640	130
SylWin1	864	640	205

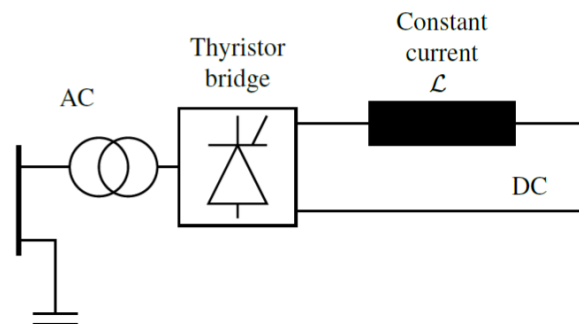
5. Sistemes de transmissió HVDC

A més de dotar al sistema amb una flexibilitat addicional a través del control del flux d'energia, el sistema de transmissió HVDC poden transmetre l'energia elèctrica a freqüència nul·la. S'utilitzen convertidors electrònics de potència entre la xarxa AC (corrent altern) i DC (corrent continu). Algunes de les aplicacions més tradicionals dels enllaços HVDC són:

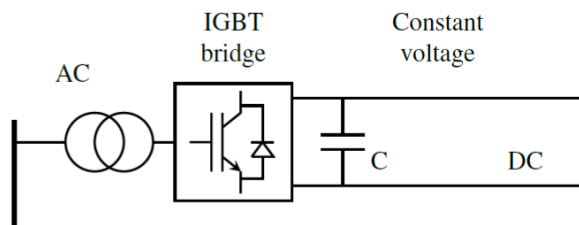
- Major transmissió d'energia a través de llargues distàncies.
- Interconnexió de sistemes asíncrons.
- Connexions submarines.

5.1. Convertidors LCC-HVDC i VSC-HVDC

Existeixen dues variants pel que fa a la transmissió HVDC. La tecnologia més comuna i antiga s'anomena LCC-HVDC (*line commutated converter*) o també CSC-HVDC (*current source converter*). Aquests tipus de convertidors utilitza tiristors com a interruptors i treballa emprant un valor constant de corrent continu. D'aquesta manera, es controla el voltatge per tal d'ajustar el flux d'energia necessari en cada instant.



(a) Current source converter



(b) Voltage source converter

II·l·lustració 1 Diagrames de línia dels convertidors LCC-HVDC i VSC-HVDC [1]

L'altra variant dels convertidors d'alta tensió es coneix amb el nom de VSC-HVDC. Aquesta tecnologia fou desenvolupada als anys noranta i, a diferència de l'anterior, utilitza IGBT com a interruptors. El seu funcionament es basa en repartir un voltatge DC constant, controlant en aquest cas el corrent per ajustar el flux d'energia. Aquesta segona tecnologia permet la connexió amb xarxes febles allunyades. Un exemple és la connexió a centrals d'energia eòlica al mar, que és pràcticament impossible de realitzar emprant convertidors LCC-HVDC. A la il·lustració 1 es mostren els esquemes d'una línia amb les dues tecnologies explicades.

Pel que fa a les avantatges d'un convertidor VSC, aquest permet un control independent de la potència activa i reactiva, la regulació de la tensió de la banda d'alterna del convertidor i una menor dimensió dels cables. Però és necessari comentar que la tecnologia VSC també presenta certs inconvenients com són les elevades pèrdues per commutació dels transistors i les limitacions pel que fa a la tensió màxima.

De totes formes, la tecnologia VSC-HVDC és vista com un facilitador per a l'alimentació dels futurs sistemes d'energia i, més concretament, com una tecnologia que permetrà la integració massiva d'energies renovables a la xarxa elèctrica de consum [5].

La transmissió d'energia a llargues distàncies respecte la font de generació renovable fins a les càrregues consumidores, però també l'equilibri entre el flux que es genera i el que es consumeix, afegeix una pressió addicional en el sistema de transmissió. A causa de la variabilitat de les fonts d'energia renovable, es requereixen solucions basculants diferents de la línia aèria AC (corrent altern) tradicional [6]. Les línies HVDC, i per extensió una quadrícula HVDC, té el potencial per solucionar els problemes abans esmentats.

5.2. Configuracions usals en les transmissions HVDC

En aquest apartat es farà una explicació sobre les principals configuracions que s'usen a l'hora de connectar dues o més estacions convertidores de corrent continu.

5.2.1. Configuració *Punt a punt*

Es tracta de la configuració més simple amb la qual es poden connectar dues estacions convertidores separades per una gran distància. Un exemple d'aquesta configuració seria la connexió entre una estació generadora situada al mar del Nord¹ i una estació convertidora a la xarxa situada a Alemanya, ambdues separades per una distància de més de 30 km.

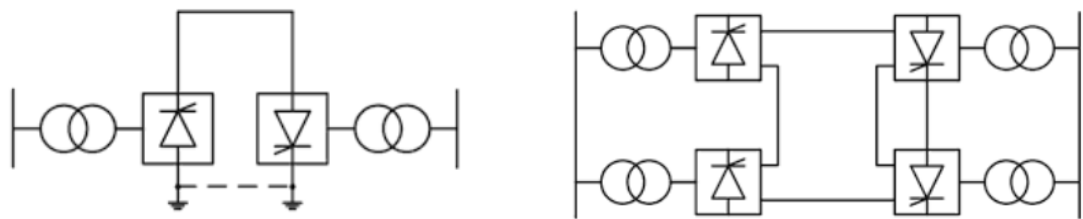
¹ El mar del Nord és un mar de l'Oceà Atlàntic limitat per Noruega, Dinamarca, Alemanya, les Illes Britàniques, Països Baixos, Bèlgica i França. En aquest emplaçament hi ha construïts multitud de parcs eòlics marins, entre els quals destaca el més gran del món, conegut com *London Array*.

5.2.2. Configuració *Back to back*

Es tracta d'una configuració semblant a la configuració *Punt a punt* perquè també enllaça dues estacions convertidores però, en aquest cas, les dues estacions es troben situades una al costat de l'altre. Així, l'objectiu d'una transmissió BTB (*back to back*) no és la transmissió d'energia a llargues distàncies sinó que és la connexió de dues xarxes asíncrones, com podrien ser-ho una de 50 Hz i una altre de 60 Hz de freqüència angular.

5.2.3. Configuració *Multiterminal*

Aquesta última classificació engloba totes aquelles connexions entre més de dues estacions convertidores. Per exemple, quan dos parcs eòlics marins injecten potència a la mateixa xarxa, o quan dos parcs eòlics marins poden transmetre energia a dues xarxes elèctriques diferents alhora. A la il·lustració 2 es poden observa una configuració BTB i una configuració multiterminal.



Il·lustració 2 Diagrames de línia d'una configuració BTB i d'una configuració multiterminal, respectivament [7]

5.3. Comparació entre les transmissions AC i DC

L'ús del corrent altern és menystingut com una opció amb potencial per a una futura superxarxa² a Europa. No obstant això, els sistemes de corrent altern serien capaços de portar grans quantitats d'energia elèctrica a grans distàncies quan s'utilitzen valors de tensió UHV o *ultra elevats* (1000 kV AC o superior). Les raons tècniques per les quals la tecnologia UHV-AC no és vista encara com una tecnologia potencial per a una superxarxa són:

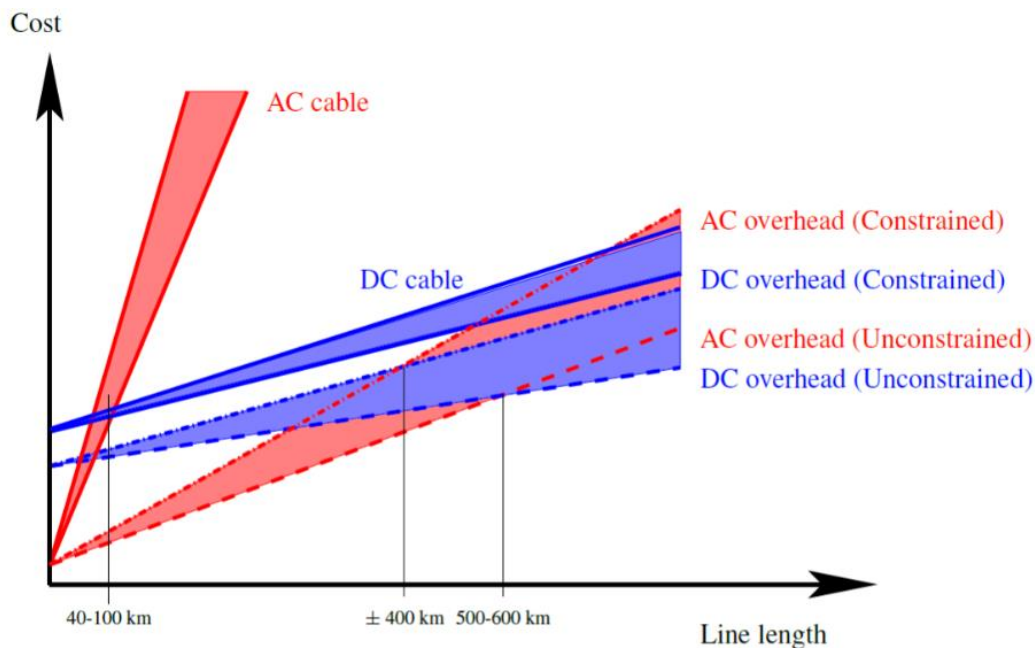
- Els cables AC experimenten una alta intensitat que limita la seva longitud.

² Aquest concepte es refereix a una xarxa que englobi una enorme àrea superficial on sigui possible transmetre grans quantitats d'energia a grans distàncies, "des de" i "fins" a qualsevol punt.

- Els cables AC llargs i sotmesos a voltatges elevats són cars i difícils de construir.
- Les línies DC mostren menys pèrdues que les línies AC.
- HVDC ofereix un control inherent sobre la potència activa, pel que és més flexible en l'ús i és més fàcil limitar les sobrecàrregues en el sistema.
- Els recursos en alta mar, així com les connexions fora del principal continent, són pràcticament inaccessibles utilitzant AC.

També hi ha raons no tècniques que estan a favor de la tecnologia DC sobre la tecnologia AC. Per exemple, l'ús de cables submarins per transportar corrent continu d'alta tensió no causa cap contaminació visual ni cap emissió de camps electromagnètics variables, així que s'espera una menor oposició i menys problemes amb el seu llicenciament i construcció. En canvi, els cables que transporten corrent altern són més difícils de construir degut a problemes amb l'entorn natural. A més, utilitzant cables per sota el mar, s'aconsegueix un cablejat més ràpid i eficaç, on es necessiten menys articulacions i es tenen menys pèrdues [6].

La il·lustració 3 mostra un gràfic representatiu del cost relatiu dels sistemes HVDC i HVAC. Com s'observa, la diferència en el preu de la instal·lació d'un sistema sense restriccions (suposant una fàcil obtenció de permisos i no tenint en compte consideracions especials com la desviació del camí ideal, proteccions sonores...) i d'un sistema amb restriccions no pot ser desestimada.



Il·lustració 3 Cost relatiu dels sistemes AC i DC amb i sense restriccions (constrained i unconstrained, respectivament) [1]

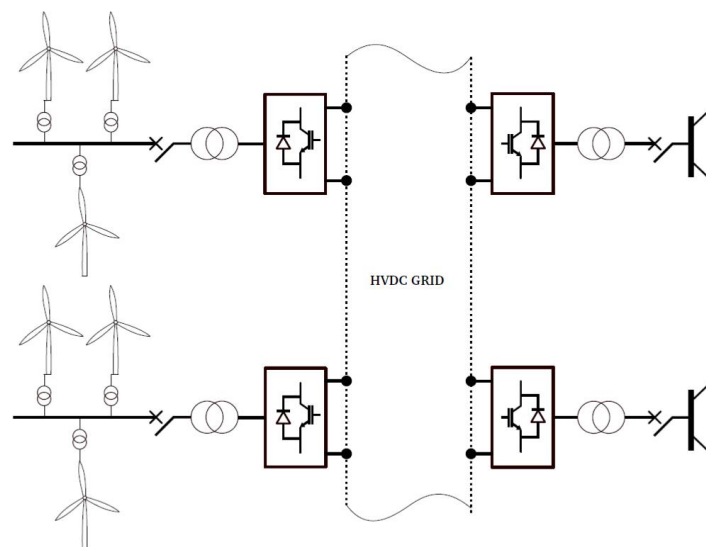
Resumint, les línies aèries de corrent continu podrien ser una opció viable des d'un punt de vista tècnic, però construir-les moltes vegades implica haver d'iniciar una llarga lluita política i mediambiental. Tot i que els cables de corrent altern no estan tan ben preparats per transportar grans quantitats de potència a llargues distàncies, en cas que aquests inconvenients burocràtics es consideressin menyspreables, les línies AC seguirien sent una opció econòmicament viable per al transport d'electricitat. Per tant, una futura superxarxa que utilitzi una combinació de tecnologia AC i DC és una opció realista.

6. Descripció del sistema utilitzat

En aquest apartat, s'introduiran els elements que conformen el sistema HVDC d'aquest projecte, explicant-ne la funció que desenvolupa cadascun d'ells.

6.1. La xarxa multiterminal global

La il·lustració 4 mostra l'esquema d'una xarxa multiterminal amb quatre convertidors VSC, dos dels quals s'enllacen amb parcs eòlics i els altres dos s'enllacen amb la xarxa elèctrica terrestre.



Il·lustració 4 Esquema d'una xarxa multiterminal en corrent continu HVDC [9]

6.2. La xarxa d'interconnexió entre els diferents sistemes

La xarxa d'interconnexió fa referència a tots els cables HVDC que són necessaris per dur a terme la correcta transmissió de la potència generada als parcs eòlics. Depenent de la manera com s'enllacin els diferents nusos del sistema, s'obindrà una configuració o una altra. En aquest projecte, s'estudiarà la configuracions punt a punt, una configuració amb 3 nodes i una configuració multiterminal amb 4 nodes, tal i com es veurà al capítol 9.

6.3. Els convertidors VSC del sistema

En tot moment es considera cada convertidor VSC del sistema global com un subsistema independent. Cada convertidor opera els seus llaços de control sense conèixer quin control apliquen els altres convertidors del sistema.

6.4. El convertidor VSC per la banda de l'aerogenerador

Pel que fa als convertidors VSC per la banda dels aerogeneradors, també coneguts com WFSVC (*wind farm VSC*), la seva funció és injectar tota la potència activa que es genera al bus de continua. Pel que fa a la potència reactiva, també són capaços d'injectar-la però només si és necessari.

6.5. El convertidor VSC per la banda de la xarxa elèctrica terrestre

Pel que fa als convertidors VSC per la banda de la xarxa elèctrica terrestre, també coneguts com GFSVC (*grid source VSC*), la seva funció és generar una tensió amb una freqüència igual a la de la xarxa principal terrestre a partir del valor de la tensió DC.

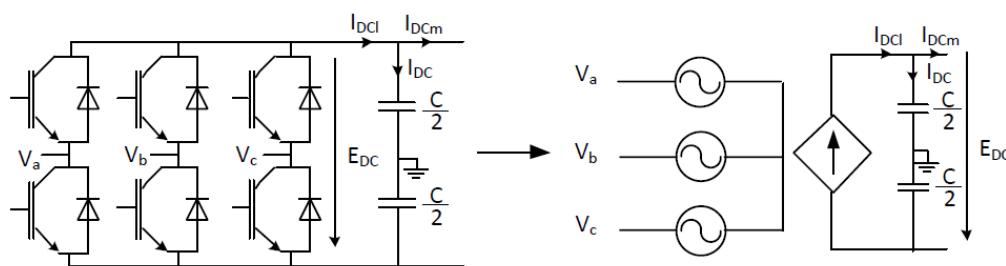
També són els encarregats d'extreure tota la potència que s'hagi introduït prèviament al bus DC per part dels aerogeneradors. Val a dir que serien capaços d'injectar potència reactiva a la xarxa elèctrica terrestre en cas que fos necessari.

7. Modelització de la xarxa HVDC

7.1. Modelització del convertidor VSC-HVDC

El convertidor VSC intercanvia energia entre una banda AC i una banda DC. Està format per tres branques amb dos IGBT, el punt mitjà dels quals està connectat a la xarxa mitjançant inductàncies. La presència d'aquests últims elements permet reduir l'aparició de perturbacions en el sistema. Una modulació adequada de la freqüència de commutació dels IGBT permet generar el voltatge trifàsic desitjat en el costat AC, controlant el flux de potència activa i reactiva.

En altres paraules, un convertidor VSC-HVDC com el que s'estudia en aquest projecte serveix per unir fonts de tensió de diferents tipologies. En concret, permet la connexió entre un sistema trifàsic de corrent altern i un sistema de corrent continu. Per tal de poder a dur a terme un estudi separat per cada banda, es necessiten desacoblar les fonts de tensió. Així, s'obté un model com el que es mostra a la il·lustració 5.



Il·lustració 5 Model d'un convertidor de fonts de tensió (VSC) [8]

Per mantenir relacionades les dues parts en què queda separat el convertidor VSC, s'usa el principi d'equilibri en el balanç de potència activa, on tota la potència injectada a la part de corrent continu del convertidor ha de ser igual a tota la potència absorbida a la part de corrent altern del convertidor. Així, doncs, malgrat no existir una connexió directa entre les parts, s'utilitza la següent expressió per mantenir-les connectades:

$$I_{DC1} = \frac{P_{AC}}{E_{DC}} \quad (7.1)$$

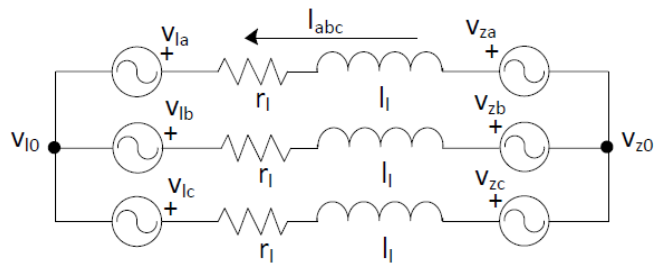
on:

P_{AC} és la potència activa a la banda de corrent altern del convertidor VSC

I_{DCI} és la intensitat que circula a la banda de corrent continu del convertidor VSC

E_{DC} és la tensió que s'obté a la banda de corrent continu del convertidor VSC

Si s'analitza la modelització del convertidor VSC a la banda de corrent continu, hom s'adonarà que es fa ús de diversos condensadors. D'aquesta manera, s'intenta aconseguir un valor de tensió constant, com el que s'obté en un convertidor real. Si s'analitza la modelització del convertidor VSC a la banda de la xarxa de corrent altern, hom s'adonarà que es fa ús d'una resistència i d'una inductància connectades en sèrie a cadascuna de les tres branques de la xarxa alterna. D'aquesta manera, s'intenten representar les pèrdues i aproximar cadascuna de les tres branques a una font de corrent. Així, s'obté un model com el que es mostra a la il·lustració 6.



Il·lustració 6 Model del convertidor VSC a la banda de la xarxa de corrent altern [8]

7.2. Modelització de la xarxa elèctrica terrestre

La xarxa elèctrica terrestre de corrent altern es considera una agrupació de tres fonts de tensió ideals generant un sistema trifàsic, simètric i equilibrat. Els valors que proporcionen aquestes fonts de tensió en funció del temps, queden recollits en la següent expressió:

$$v_{zabc} = V_{pic} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega_e \cdot t + \phi) \\ \cos(\omega_e \cdot t + \phi - \frac{2}{3}\Pi) \\ \cos(\omega_e \cdot t + \phi + \frac{2}{3}\Pi) \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

on:

v_{zabc} és la tensió en referència abc de la xarxa elèctrica terrestre

V_{pic} és la tensió de pic de la xarxa elèctrica terrestre

ϕ és l'angle de desfasament de la tensió de la xarxa elèctrica terrestre

ω_e és la velocitat angular de la xarxa elèctrica terrestre

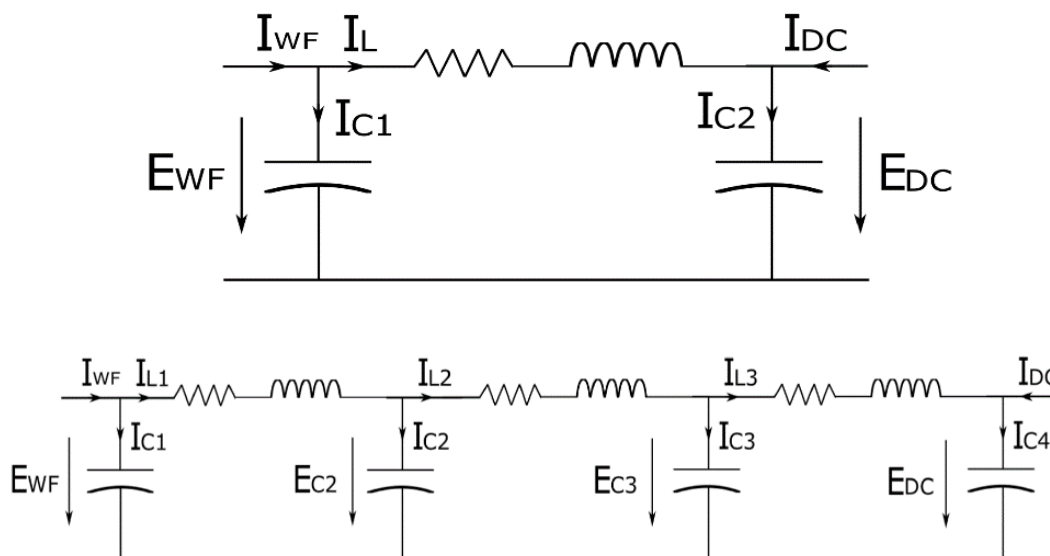
7.3. Modelització de la xarxa del parc eòlic marí

A la xarxa AC del parc eòlic marí estudiada s'ha considerat que la intensitat generada pels aerogeneradors serà variable en funció del temps. Pel que fa a la tensió del convertidor VSC per la banda del parc eòlic, aquesta mantindrà el seu valor constant, V_{peakwf}

7.4. Modelització dels cables HVDC

Alhora de modelitzar els cables HVDC, un dels paràmetres clau és la seva longitud ja que es tracta d'elements que poden arribar a tenir més de 50 km de llargada. A més, cal modelitzar-los de manera que mostrin un comportament dinàmic. En el present projecte, s'analitzaran diferents senyals i el seu comportament en funció del temps, així doncs els cables HVDC també hauran de garantir aquesta variabilitat.

Existeixen diferents possibilitats alhora de modelitzar els cables. A la il·lustració 7, es mostra un model en pi simple i un model en pi de seccions múltiples.



Il·lustració 7 Model del cable en pi simple i en pi de seccions múltiples [8]

És evident que el model equivalent en pi simple és idoni per a l'anàlisi dels cables com un sistema amb dues variables d'entrada i dues de sortida. Així, es poden considerar com a inputs el corrent I_{wf} i el corrent I_{DC} . Com a outputs del sistema cable, es poden considerar la tensió continua a la banda del parc eòlic, E_{wf} , i la tensió a controlar a la banda de la xarxa, E_{DC} .

A partir del model equivalent en π simple es pot aconseguir el de seccions múltiples. Hom pot imaginar-se que les propietats d'un cable de més de 50 km de llargada poden variar per trams. A major nombre de seccions, major nombre de variables i més precisió en la modelització.

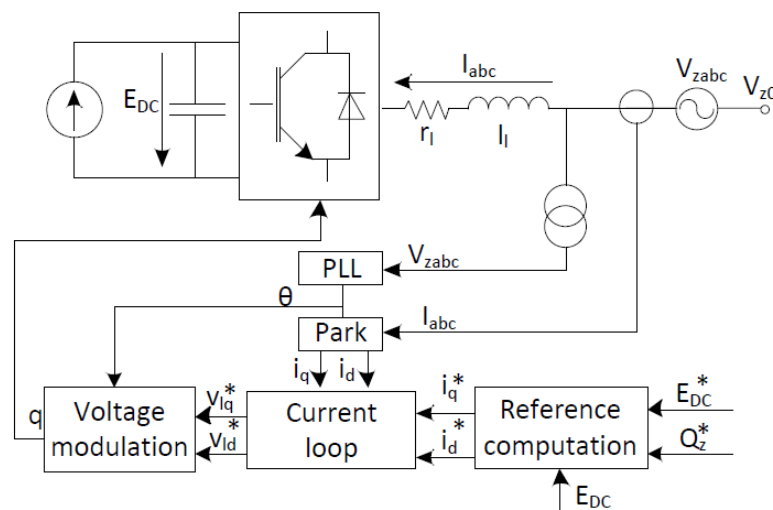
En el present projecte, s'ha optat per treballar amb un model en π simple, per tal de centrar l'estudi en les variables de la xarxa elèctrica terrestre així com en la potència injectada pels aerogeneradors. De totes formes, la millora de la modelització dels cables HVDC seria un bon punt de partida per a futurs projectes.

8. Control de la xarxa HVDC

8.1. Convertidor VSC a la banda de la xarxa de corrent altern

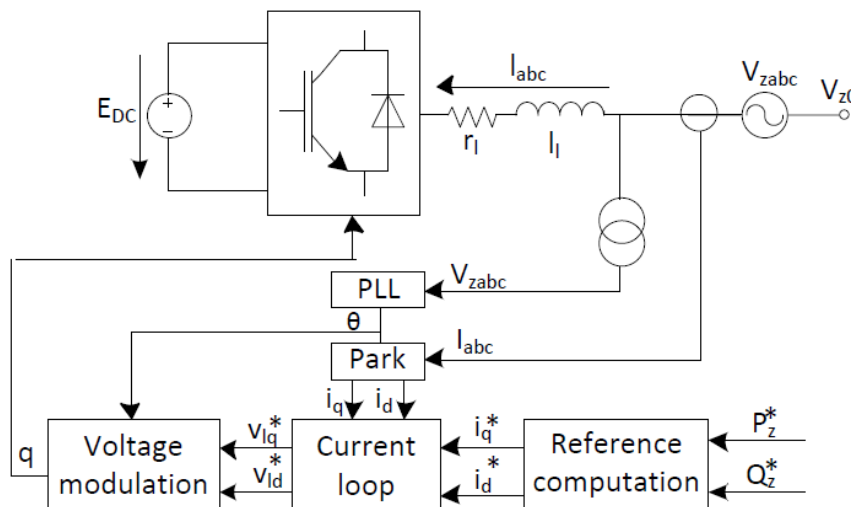
El convertidor VSC permet el control de dues variables elèctriques en el marc $qd0$. En altres paraules, es podran dominar per separat la potència activa i la reactiva. El valor de la potència reactiva pot ser obtingut per un controlador d'ordre superior a l'analitzat o, simplement, establir-se un valor concret. Pel que fa al valor de la potència activa, aquest depèn de la naturalesa de la font connectada a la banda de corrent continu [8]:

- En el cas de sistemes d'energia renovable, s'ajusta el seu valor per tal d'assegurar l'equilibri del balanç de potència, aconseguint que la potència injectada a la xarxa sigui la mateixa que la potència generada.



Il·lustració 8 Esquema general d'un convertidor VSC per a sistemes d'energia renovable [8]

- En el cas de sistemes d'emmagatzematge d'energia, s'ajusta el seu valor per tal de carregar una bateria o injectar potència a la xarxa, segons l'operació del sistema de gestió d'energia o del sistema on el sistema d'emmagatzematge estigui connectat.



Il·lustració 9 Esquema general d'un convertidor VSC per a sistemes d'emmagatzematge d'energia [8]

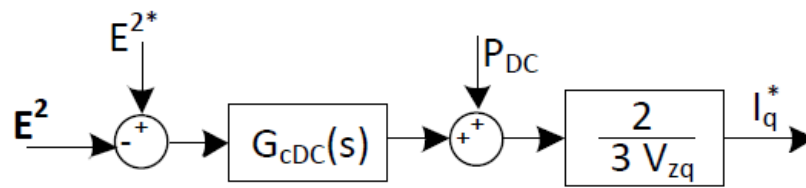
És evident que el cas que concerneix aquest treball és el de les energies renovables. Si hom es fixa en la il·lustració 8, veurà com el convertidor permet dominar dues variables elèctriques, com són E_{DC}^* i Q_z^* . Per tant, la variable E_{DC} correspon al valor de la tensió de corrent continu al VSC, que variarà segons la producció d'energia elèctrica al parc eòlic.

Pel que fa al funcionament del convertidor VSC a la banda de la xarxa de corrent altern, hom pot discernir tres grans blocs: *Reference computation*, *Current loop* i *Voltage modulation*. A més, en la il·lustració 8 també apareixen dos altres blocs: *Park* i *PLL*. Per tal de situar el lector, es procedirà a explicar el funcionament global del convertidor mitjançant l'anàlisi individual de cadascuna de les seves parts.

8.1.1. Reference computation o Llaç de tensió

El control de llaç de tensió és necessari per assegurar l'equilibri en el balanç de potència ja comentat anteriorment, on tota l'energia que s'injecta a la xarxa de corrent altern és equivalent a l'energia produïda per la rotació dels aerogeneradors del parc eòlic.

En una primera aproximació, hom podria dir que el llaç de tensió rep com a variables d'entrada el valor de la tensió contínua que es vol injectar a la xarxa (E_{DC}^*) i el valor de la potència reactiva desitjada ($Q_z^* = 0$). El mateix llaç de tensió proporciona com a variable de sortida el valor del corrent equivalent a l'entrada desitjada (i_q^*).



Il·lustració 10 Diagrama de blocs del Reference computation o Llaç de tensió [8]

Cal fer èmfasi en dos detalls vistos a la il·lustració 10, relacionats amb les entrades del llaç de tensió i amb les potències que hi intervenen.

Respecte les variables d'entrada al llaç de tensió (considerant $Q_z^* = 0$), s'ha de dir que aquest llaç rep la tensió continua mesurada al VSC ($E = E_{DC}$) i la tensió desitjada al mateix VSC ($E^* = E_{DC}^*$). Ambdues tensions es troben elevades al quadrat. La comparació d'aquests dos valors entra en un controlador per tal d'obtenir la potència activa que s'hauria de subministrar al convertidor VSC (P_{DC}^*).

Respecte les potències que formen part del llaç de tensió, el valor de la potència desitjada en el condensador del convertidor se suma a la potència actual mesurada just abans del condensador (P_{DC}), donant com a resultat la potència total que s'ha de subministrar al VSC (P^*).

$$P^* = P_{DC}^* + P_{DC} \quad (8.3)$$

El motiu pel qual les tensions d'entrada al llaç es troben elevades al quadrat és ben senzill. Sabent que durant del llaç de tensió s'haurà de treballar amb el valor de diferents potències actives, i sabent també que el valor d'una tensió al quadrat és sempre proporcional a l'energia emmagatzemada al condensador, es treballa així per tal d'obtenir resultats més precisos. A continuació, es mostra en el domini de Laplace l'equació de la potència que ho justifica.

$$P_C = \frac{1}{2} s \cdot C \cdot E^2(s) \quad (8.4)$$

on:

P_C és la potència que emmagatzema el condensador

C és la capacitat pròpia del condensador

E és la tensió en borns del condensador

8.1.1.1. Equacions del Reference computation o Llaç de tensió

Pel que fa als blocs que conformen el llaç de tensió, aquests estan governats per les següents equacions algebraiques.

8.1.1.1.1 Controlador PI

$$G_{RC}(s) = G_{CDC}(s) = \frac{K_{pRC} \cdot s + K_{iRC}}{s} \quad (8.5)$$

$$K_{pRC} = C \cdot \xi_{RC} \cdot \omega_{RC} \quad (8.6)$$

$$K_{iRC} = \frac{C \cdot \omega_{RC}^2}{2} \quad (8.7)$$

on:

C és la capacitat pròpia del condensador

ξ_{RC} és el *damping ratio* desitjat en el llaç de tensió

ω_{RC} és la velocitat angular en el llaç de tensió

K_{iRC} és la constant integradora del reference computation

K_{pRC} és la constant proporcional del reference computation

8.1.1.1.2 Bloc potència-intensitat

$$i_q^* = \frac{2}{3} \frac{P^*}{v_{zq}} \quad (8.8)$$

on:

v_{zq} és la component q en referència $qd0$ de la tensió de la xarxa elèctrica terrestre

P^* és la potència activa, amb condensador, que s'hauria de subministrar al VSC (banda xarxa)

i_q^* és el corrent q en referència $qd0$ desitjat al convertidor VSC (banda xarxa elèctrica)

8.1.2. Control Droop

A continuació es presenta un tipus de control anomenat control *droop*. Aquest control presenta diverses característiques que faciliten un futur anàlisi d'una xarxa multiterminal HVDC, algunes de les qual són les següents:

- No és necessari tenir terminals interconnectats perquè el control *droop* actua directament sobre la tensió en borns del convertidor corresponent, fent que el sistema sigui més robust.

- Reparteix la potència que prové dels parcs eòlics entre els diferents convertidors connectats a la xarxa elèctrica terrestre.
- És un control molt fàcil d'implementar perquè és proporcional.

Ara bé, tot i presentar diversos avantatges, no es pot garantir que aquest sigui el control més òptim. Probablement, hi hagi altres controls que permetin extreure un rendiment més elevat del sistema [9].

8.1.2.1. Equacions del control *Droop*

$$i^* = K_{droop} \cdot (E - E_0) \quad (8.9)$$

i^* és el corrent que s'obté del control *droop*

K_{droop} la constant *droop*, que és la base del control *droop*

E és la tensió del bus de continua en el terminal on actua el control *droop*

E_0 és la tensió de referència del control *droop*

És important saber que cada convertidor VSC connectat a la xarxa elèctrica terrestre tindrà la seva pròpia constant de *droop*.

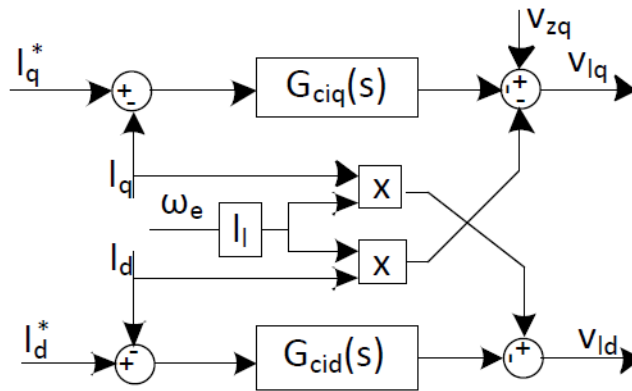
8.1.3. Reference computation i control *droop*

Amb qualsevol dels dos controls s'obté com a sortida la variable *intensitat desitjada* i^* o i_q^* a partir de la tensió DC de l'enllaç HVDC i de la tensió DC de referència. Ara bé, el reference computation inclou un controlador PI i la suma d'una potència de l'enllaç de contínua, mentre que el control *droop* només inclou una constant proporcional.

Així, seguint els motius explicats en l'apartat anterior, s'ha decidit realitzar aquest projecte amb el control *droop* enlloc d'utilitzar el reference computation.

8.1.4. Current loop o Llaç de corrent

En una primera aproximació, hom podria dir que el llaç de corrent rep com a variables d'entrada el valor dels corrents reals que circulen pel convertidor VSC (i_q i i_d) i el valor dels corrents desitjats al convertidor (i_q^* i i_d^*). El mateix llaç de corrent proporciona com a variable de sortida el valor de les tensions (v_{lq} i v_{ld}) per tal que els corrents que circulen pel convertidor siguin iguals als desitjats. A la il·lustració 11 es mostra l'esquema del llaç de control.



II-lustració 11 Diagrama de blocs del Current loop o Llaç de corrent [8]

Suposant que el PLL del sistema funciona de manera correcta, aleshores $v_{zd} = 0$ i, per tant, el conjunt d'equacions que relacionen les tensions i intensitats del llaç de corrent s'expressen en forma de matriu així:

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & l_l \cdot \omega_e \\ -l_l \cdot \omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

on:

v_{zq} és la component q en referència $qd0$ de la tensió de la xarxa d'alterna

v_{lq} és la component q en referència $qd0$ de la tensió del convertidor VSC

v_{ld} és la component d en referència $qd0$ de la tensió del convertidor VSC

i_q és la component q en referència $qd0$ del corrent que circula pel convertidor VSC

i_d és la component d en referència $qd0$ del corrent que circula pel convertidor VSC

r_l és la resistència d'acoblament

l_l és la inductància d'acoblament

ω_e és la velocitat angular de la tensió de la xarxa d'alterna

Si volem aconseguir un control independent de les intensitats i_q i i_d , podem desacoblar-les.

Aleshores, el conjunt d'equacions que relacionen les tensions i intensitats del llaç de corrent s'expressen en forma de matriu així:

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{lq} + v_{zd} - l_l \cdot \omega_e \cdot i_{ld} \\ -\hat{v}_{ld} + l_l \cdot \omega_e \cdot i_{lq} \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

on:

\hat{v}_{lq} és la component q en referència $qd0$ de la tensió de sortida del llaç de corrent

\hat{v}_{ld} és la component d en referència $qd0$ de la tensió de sortida del llaç de corrent

Combinant els dos sistemes d'equacions matricials vistos anteriorment, s'obté:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{lq} \\ \hat{v}_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 \\ 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (8.12)$$

Utilitzant la transformació de Laplace, es poden aconseguir les següents funcions de transferència entre corrents i voltatges:

$$\frac{\hat{v}_{lq}(s)}{\hat{i}_q(s)} = \frac{1}{l_l \cdot s + r_l} \quad (8.14)$$

$$\frac{\hat{v}_{ld}(s)}{\hat{i}_d(s)} = \frac{1}{l_l \cdot s + r_l} \quad (8.13)$$

8.1.5. Equacions del Current loop o Llaç de corrent

Aplicant la tècnica *Internal Model Control (IMC)*, es poden aconseguir les expressions equivalents en forma de convertidor a partir de les transmitàncies vistes en l'apartat anterior:

$$G_{CL}(s) = G_{Ciq}(s) = G_{Cid}(s) = \frac{K_{pCL} + K_{iCL}}{s} \quad (8.15)$$

$$K_{iCL} = \frac{r_l}{\tau} \quad (8.16)$$

$$K_{pCL} = \frac{l_l}{\tau} \quad (8.17)$$

on:

τ és la constant de temps en bucle tancat del sistema elèctric

La constant de temps en bucle tancat depèn de les restriccions físiques del convertidor, tot i que és usual definir-la un nombre de cops superior (per exemple 10) a la freqüència de commutació del convertidor.

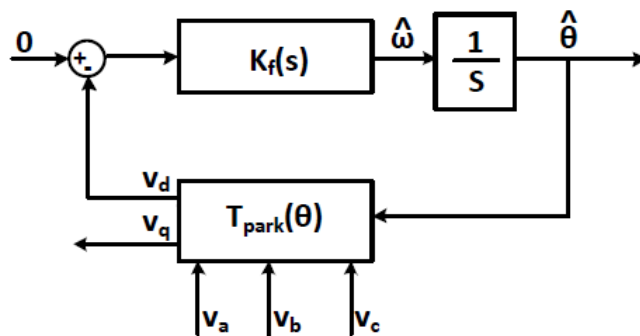
8.1.6. Voltage modulation

El convertidor VSC pot aplicar els voltatges estudiats modulant-los emprant la tècnica de la *Modulació per Amplada de Pols (PWM)*. Hi ha diverses metodologies per implementar la *PWM* com, per exemple, la tècnica àmpliament utilitzada del *Space Vector PWM (SVPWM)*.

8.1.7. PLL o Phase locked loop

El *Phase locked loop (PLL)* s'utilitza per determinar l'angle i la velocitat angular de la xarxa elèctrica. Un *PLL trifàsic* consisteix en una realimentació de la tensió de la xarxa en l'eix *d* (v_{zd}) mitjançant un controlador PI. La sortida d'aquest controlador correspon a la velocitat angular de la xarxa (ω_e), que un cop integrada esdevé l'angle de la xarxa (θ). Finalment, es torna a calcular la tensió de la xarxa en l'eix *d* (v_{zd}) gràcies a la *Transformació de Park*, la qual necessita l'angle de la xarxa (θ) prèviament obtingut, juntament amb la tensió de la xarxa (v_{zabc}).

A la il·lustració 12, es mostra l'esquema que exemplifica les paraules anteriors.



Il·lustració 12 Diagrama de blocs del Phase locked loop o PLL [8]

8.1.7.1. Equacions del PLL o Phase locked loop

$$G_{PLL}(s) = K_f(s) = K_{pPLL} \cdot \left(\frac{\frac{1}{\tau_{PLL}} + s}{s} \right) \quad (8.18)$$

$$\omega_e = \sqrt{\frac{K_{pPLL} \cdot E_m}{\tau_{PLL}}} \quad (8.19)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{\tau_{PLL} \cdot K_{pPLL} \cdot E_m}}{2} \quad (8.20)$$

on:

K_{pPLL} és la constant proporcional del *PLL*

τ_{PLL} és la constant de temps del *PLL*

ω_e és la velocitat angular de la tensió de la xarxa d'alterna

ξ és el *damping ratio*

E_m és el valor màxim del pic de voltatge admès per la xarxa elèctrica

9. Simulació

9.1. Paràmetres utilitzats

Taula 2 Paràmetres de la xarxa alterna elèctrica terrestre

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Velocitat angular de la xarxa alterna	ω_e	314.16	rad/s
Tensió de línia de la xarxa alterna	U_{gr}	320,00	kV
Tensió de pic de la xarxa alterna	V_{gr}	184.75	kV
Resistència VSC per la banda de la xarxa alterna	R_{gr}	0.9734	Ω
Inductància VSC per la banda de la xarxa alterna	L_{gr}	0.0620	H

Taula 3 Paràmetres del Phase locked loop o PLL

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Constant de proporcionalitat	$K_{p,PLL}$	1	
Constant integradora	$K_{i,PLL}$	1000	
Constant de temps	τ_{PLL}	1	ms

Taula 4 Paràmetres del Current loop o Llaç de corrent

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Constant de proporcionalitat	$K_{p,CL}$	61,97	
Constant integradora	$K_{i,CL}$	973,4	
Constant de temps	τ_{CL}	1	ms

Taula 5 Paràmetres del Control droop

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Tensió continua de referència	$E_{DC,ref}$	640	kV
Constant de proporcionalitat	K_{droop}	(veure casos)	

Taula 6 Paràmetres de la xarxa alterna del parc

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Tensió de pic a la banda alterna del parc	$V_{peak,wf}$	122,47	V

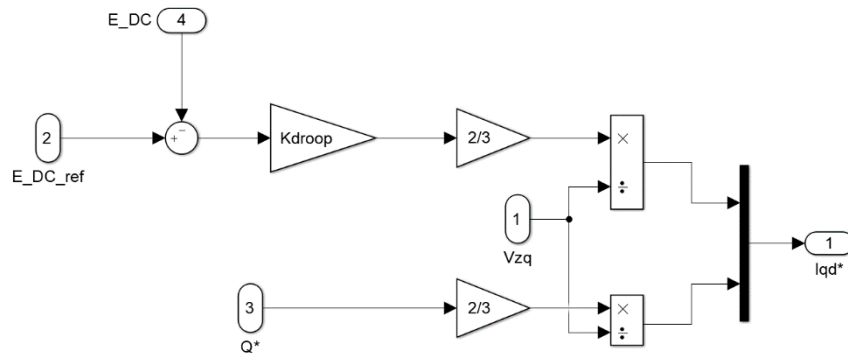
Taula 7 Paràmetres de l'enllaç HVDC

Paràmetre	Notació	Valor numèric	Unitats
Resistència d'un cable HVDC	R_{DC}	0.0095	Ω/Km
Inductància d'un cable HVDC	L_{DC}	1.056	mH/km
Capacitat banda de continua HVDC	C_{DC}	0.1906	$\mu\text{F}/\text{km}$

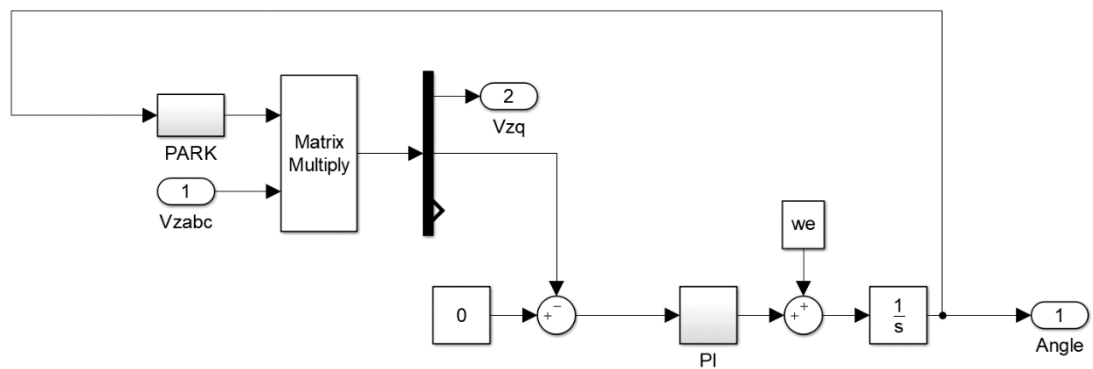
9.1.1. Justificació dels paràmetres utilitzats

Val a dir que els paràmetres utilitzats no són inventats ni han estat escollits a l'atzar. Pel que fa al control del PLL i del llaç de corrent, els paràmetres s'han extret de [8]. Per la resta de variables, és a dir, les de la xarxa alterna, control droop, la xarxa alterna del parc i els de l'enllaç HVDC, s'han extret de [10]

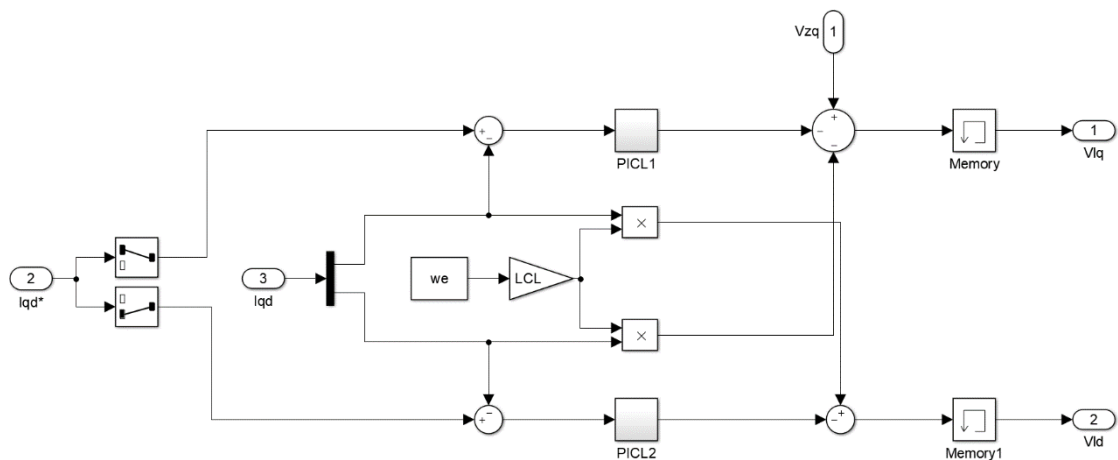
9.2. Control del VSC per la banda de la xarxa elèctrica terrestre



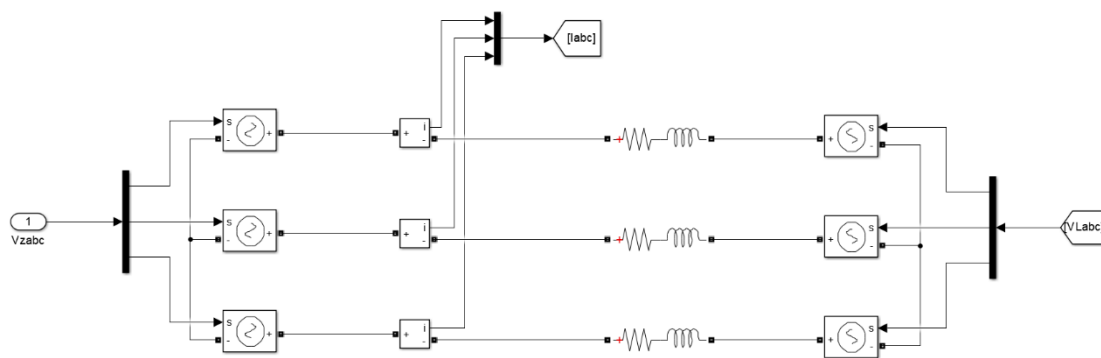
II-lustració 13 Control del Control droop



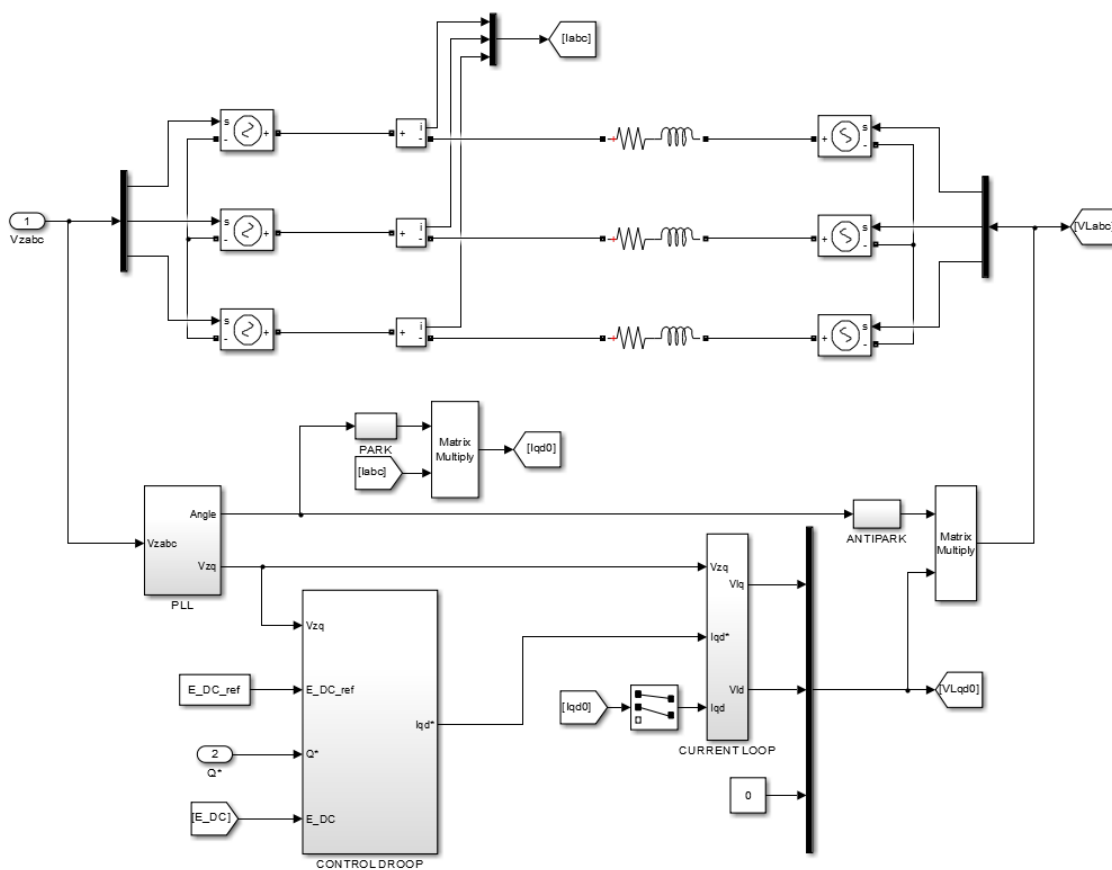
II-lustració 14 Control del PLL o Phase locked loop



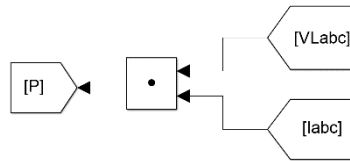
II-lustració 15 Control del Current loop o Llaç de corrent



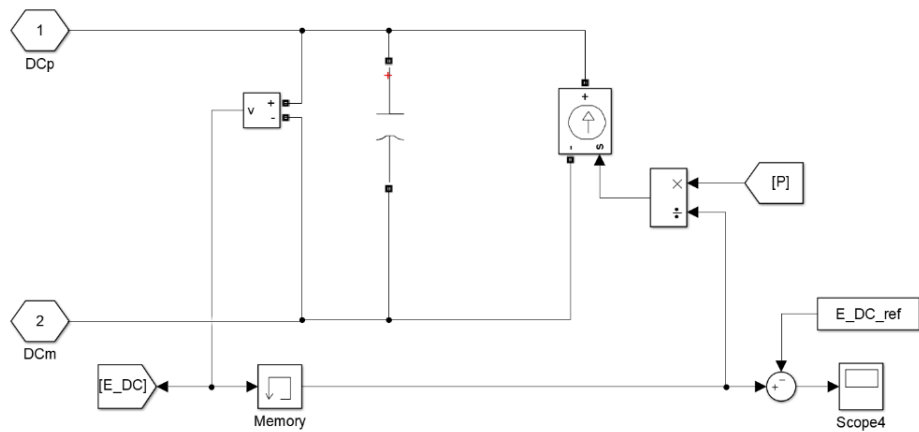
II-lustració 16 Control de la xarxa elèctrica terrestre



II-lustració 17 Control general del VSC per la banda de la xarxa alterna

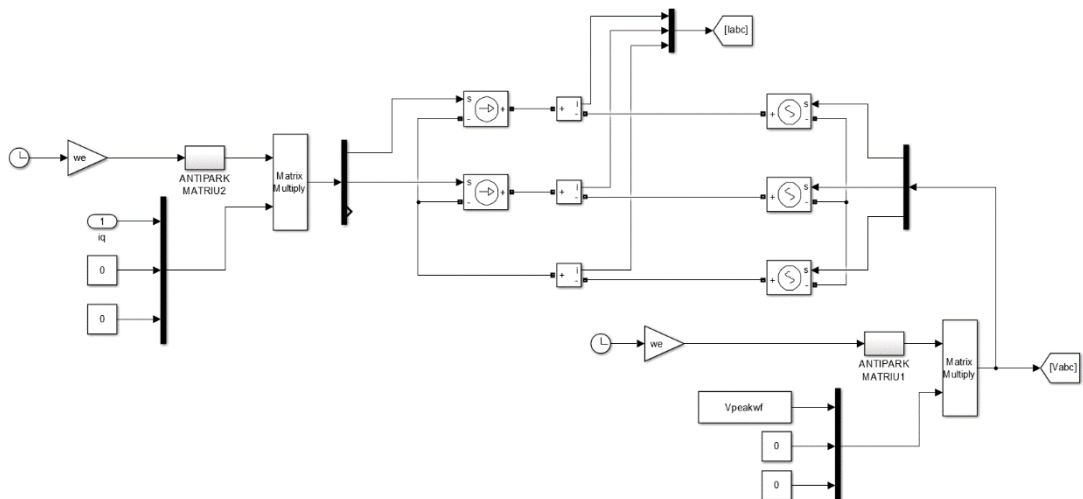


II-lustració 18 Potència del VSC per la banda de la xarxa elèctrica terrestre

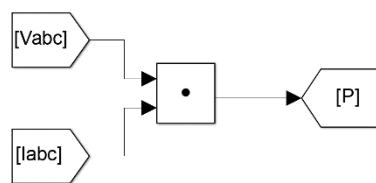


II-lustració 19 Convertidor VSC (DC to AC xarxa elèctrica terrestre)

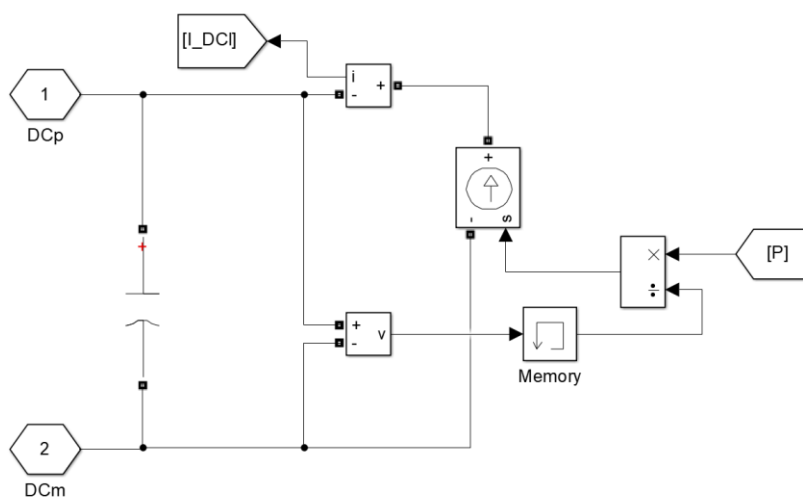
9.3. Control del VSC per la banda dels aerogeneradors



II-lustració 20 Control general del VSC per la banda dels aerogeneradors



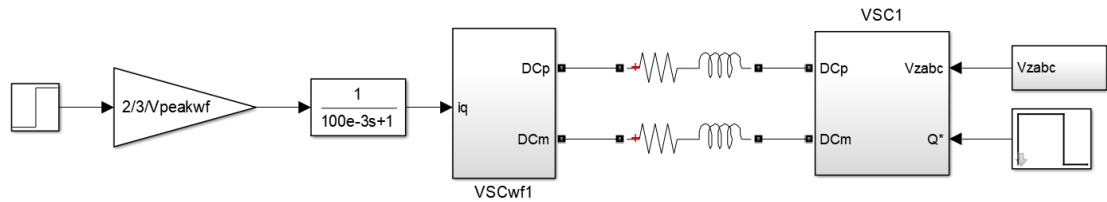
II-lustració 21 Potència del VSC per la banda dels aerogeneradors



II-lustració 22 Convertidor VSC (AC aerogeneradors to DC)

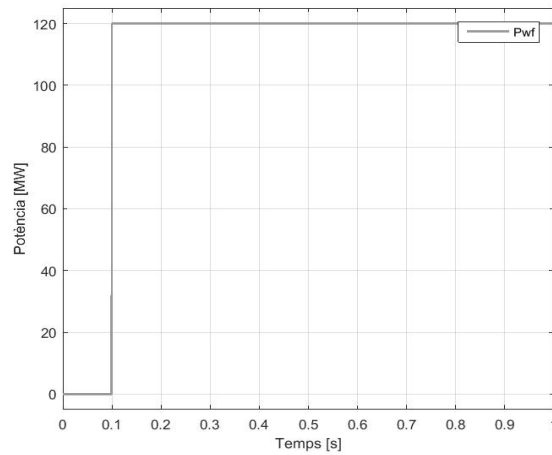
9.4. Simulació de la configuració punt a punt

Per a la realització d'aquesta simulació s'ha considerat una distància entre convertidors de 150 km i una K_{droop} de 6250

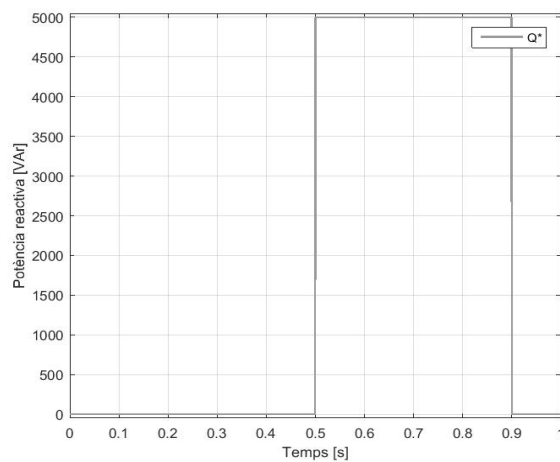


Il·lustració 23 Diagrama de blocs de la configuració Punt a punt

9.4.1. Variables d'entrada

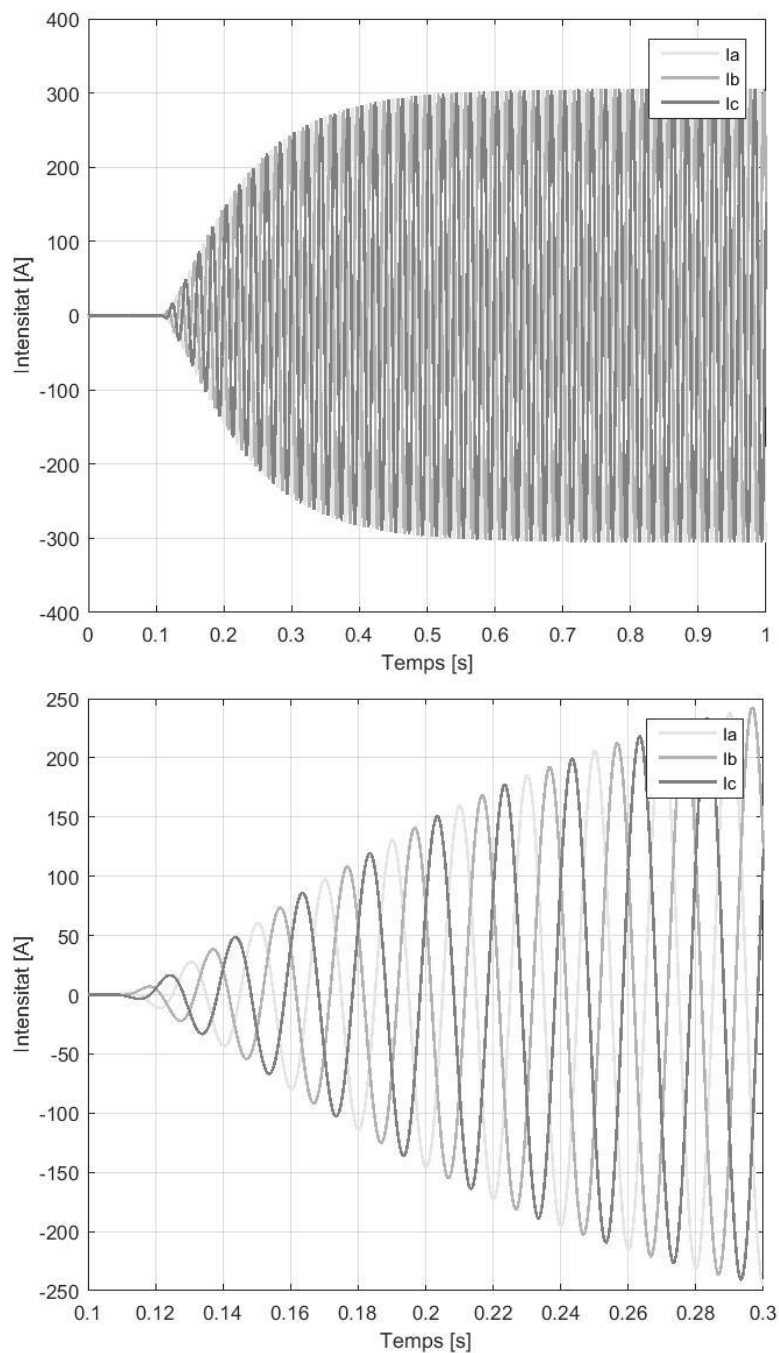


Il·lustració 24 Entrada esglaó per la variable P_{wf}



Il·lustració 25 Entrada esglaó per la variable Q^*

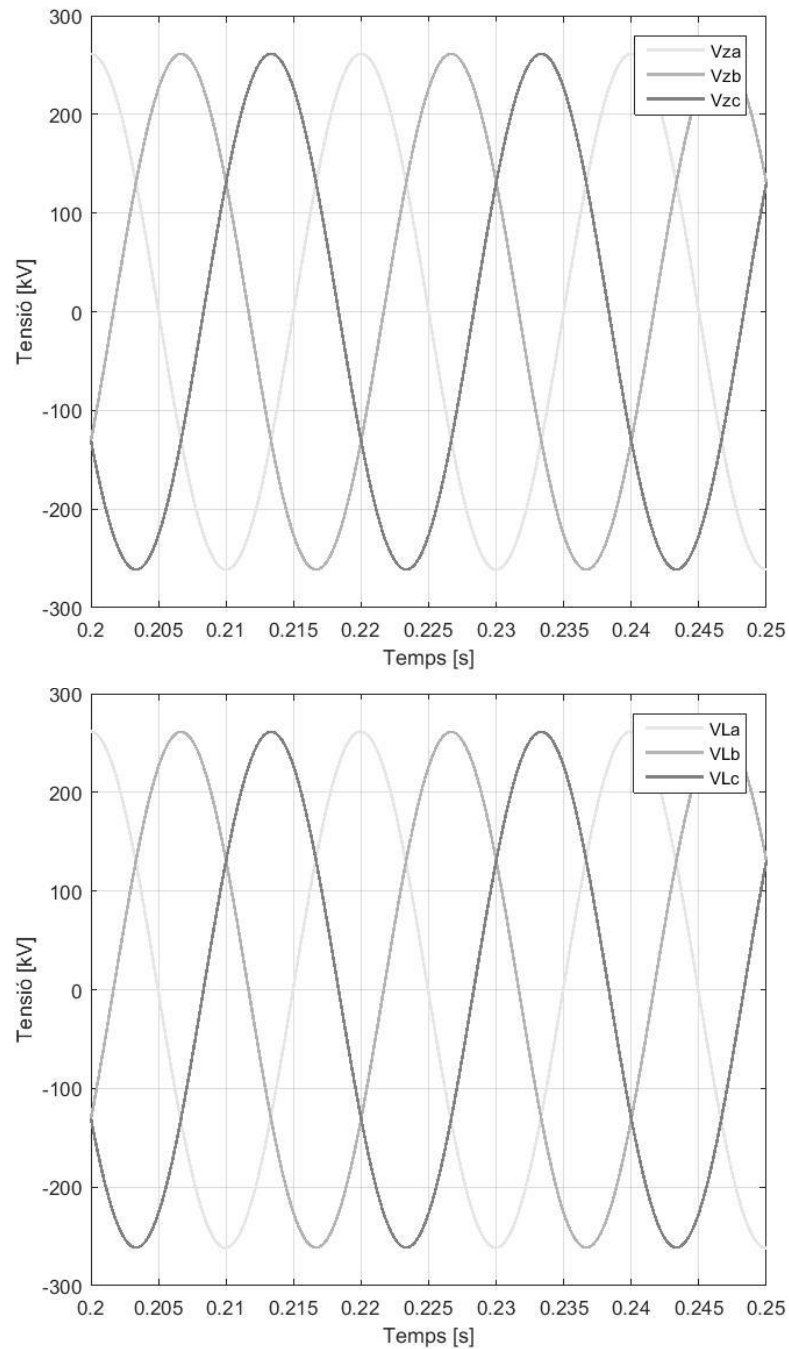
9.4.2. Resultats de la simulació punt a punt



Il·lustració 26 Intensitat trifàsica en referència absoluta. Règim transitori i permanent

Comentari sobre la il·lustració 26:

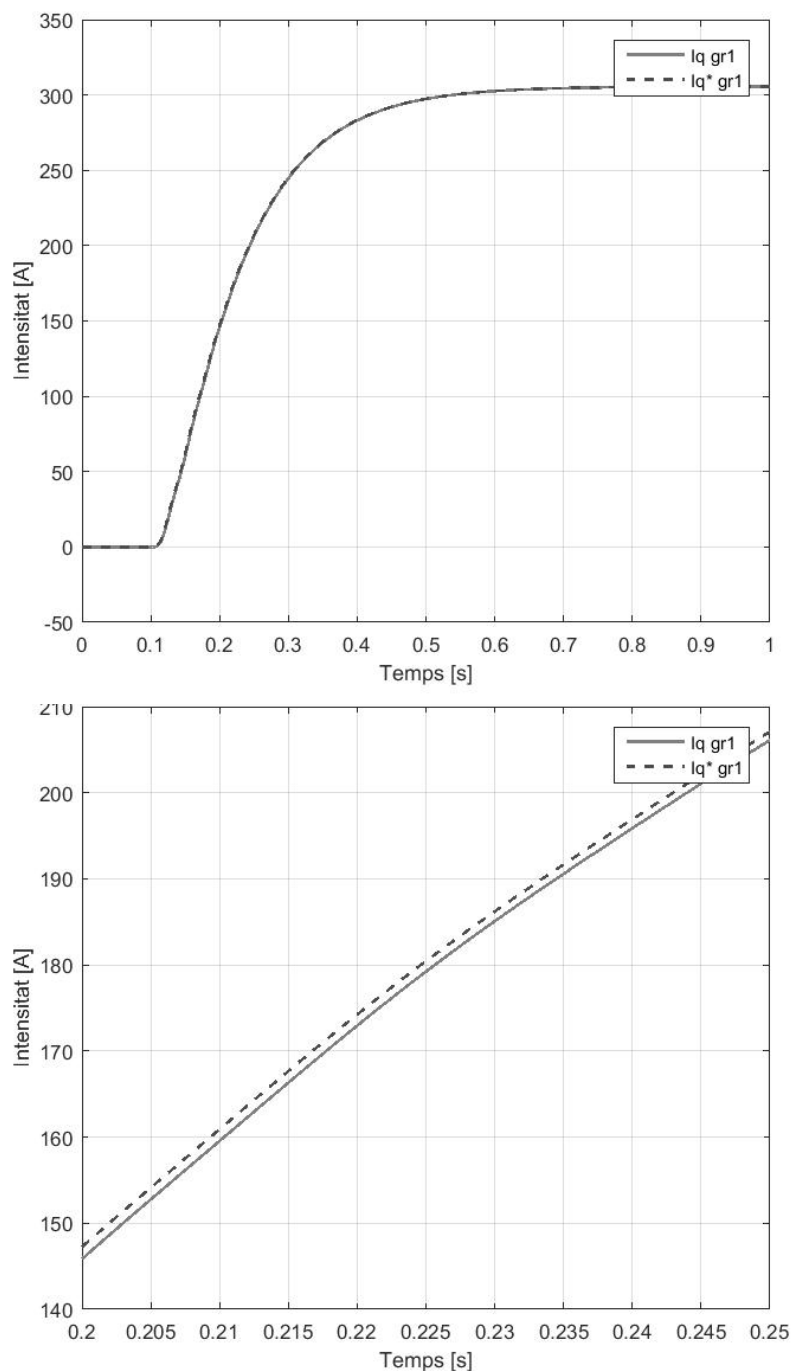
La primera senyal d'entrada no apareix fins als 0.1 s i, per tant, la resposta tampoc és visible fins aleshores. Arribat aquest instant, es produeix un estat transitori fins als 0.5 s, on el sistema finalment ja es manté constant en el temps.



Il·lustració 27 Comparació de la tensió de la xarxa (v_{zabc}) i la tensió del control (v_{labc})

Comentari sobre la il·lustració 27:

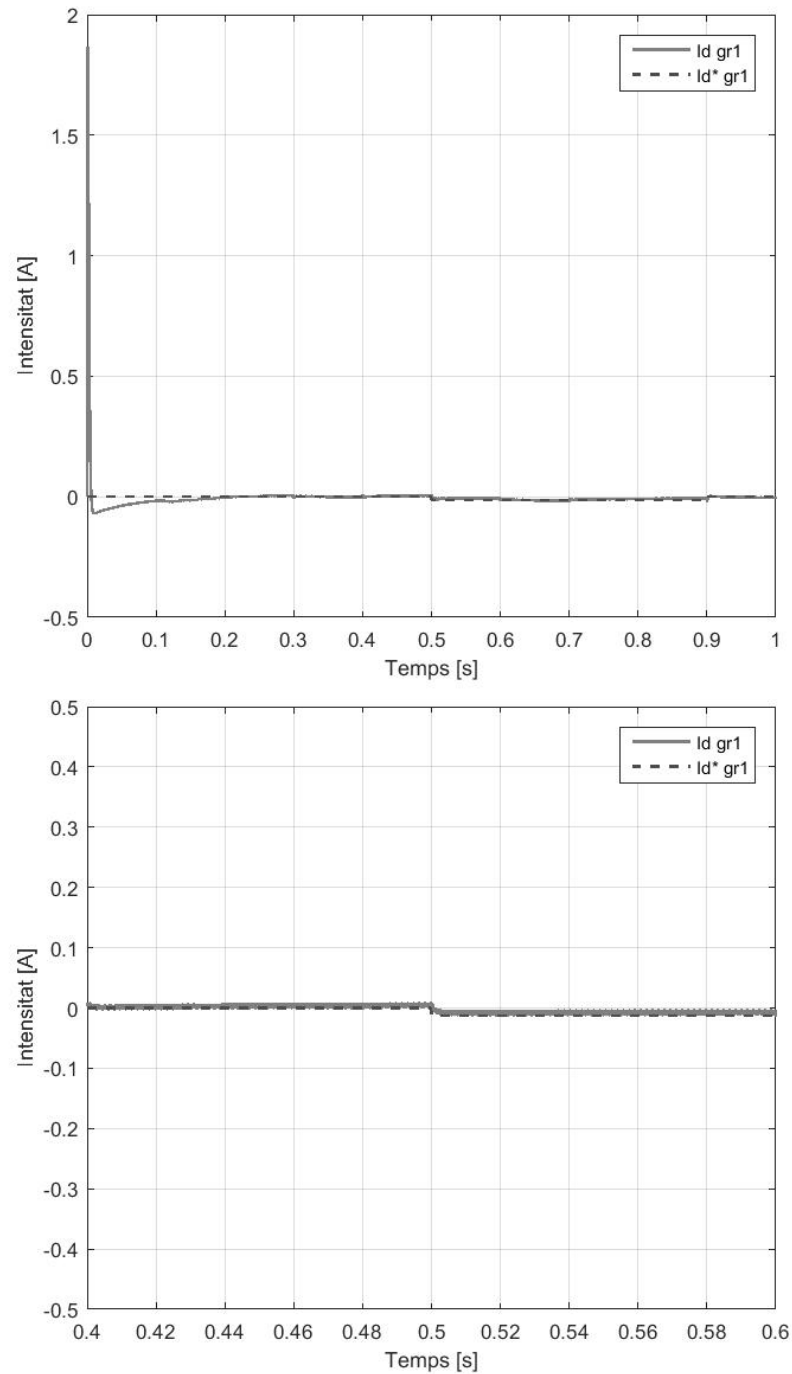
Les tensions de la xarxa elèctrica terrestre, v_{zabc} , es mantenen oscil·lant segons les ones generades. Les tensions obtingudes a partir del control del VSC, v_{labc} , són gairebé idèntiques a les de la xarxa real. Això passa perquè la impedància que les relaciona és pràcticament nul·la.



Il·lustració 28 Comparació dels corrents i_q i i_q^*

Comentari sobre la il·lustració 28:

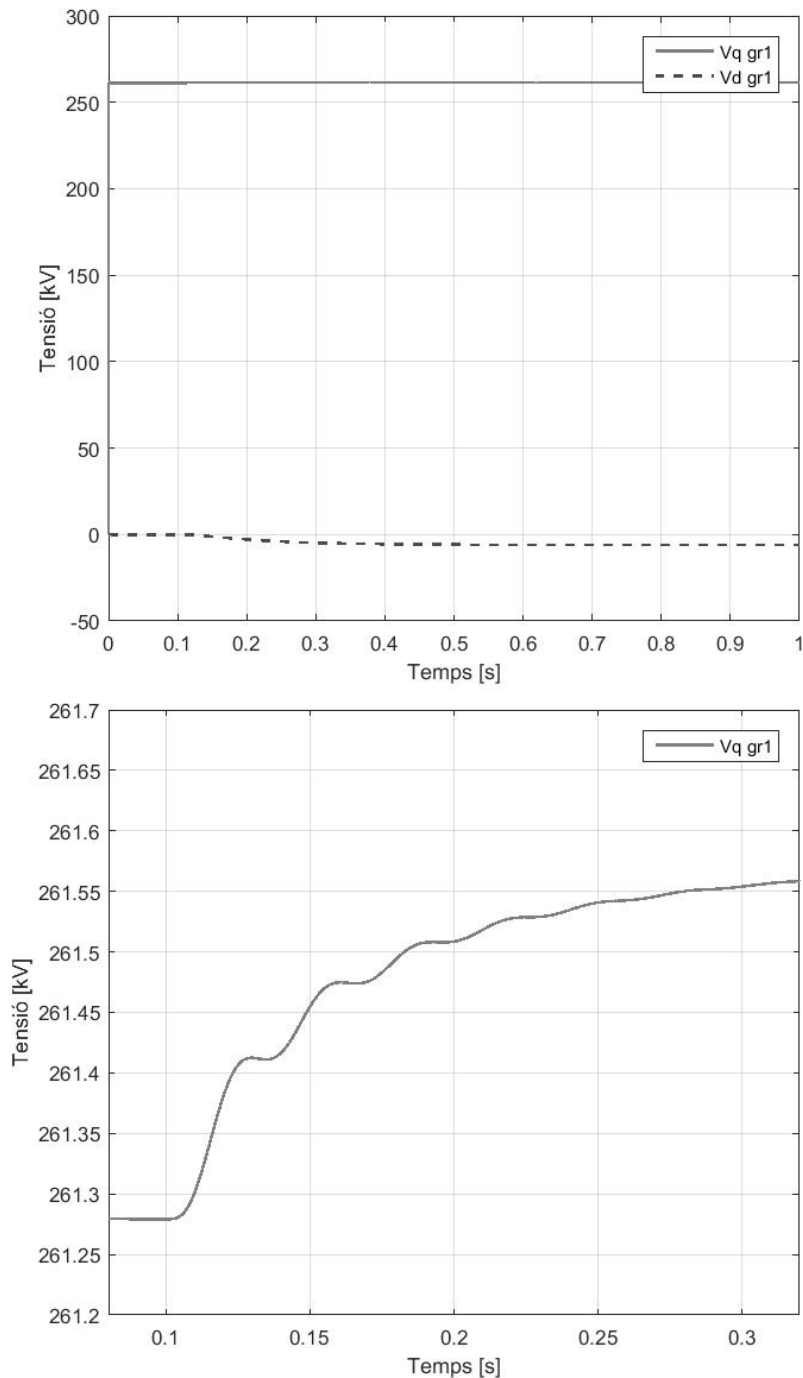
Els corrents i_q i i_q^* són molt semblants i, per tant, el control és molt fiable. Hom pot pensar que és estrany que en tot instant es mantinguin paral·lels, però això és degut al filtre que porta la intensitat desitjada i que la suavitza. Sense el filtre, veuríem com la senyal desitjada seria un graó mentre que la i_q no podria resseguir amb tanta facilitat la senyal rectangular.



Il·lustració 29 Comparació dels corrents i_d i i_d^*

Comentari sobre la il·lustració 29:

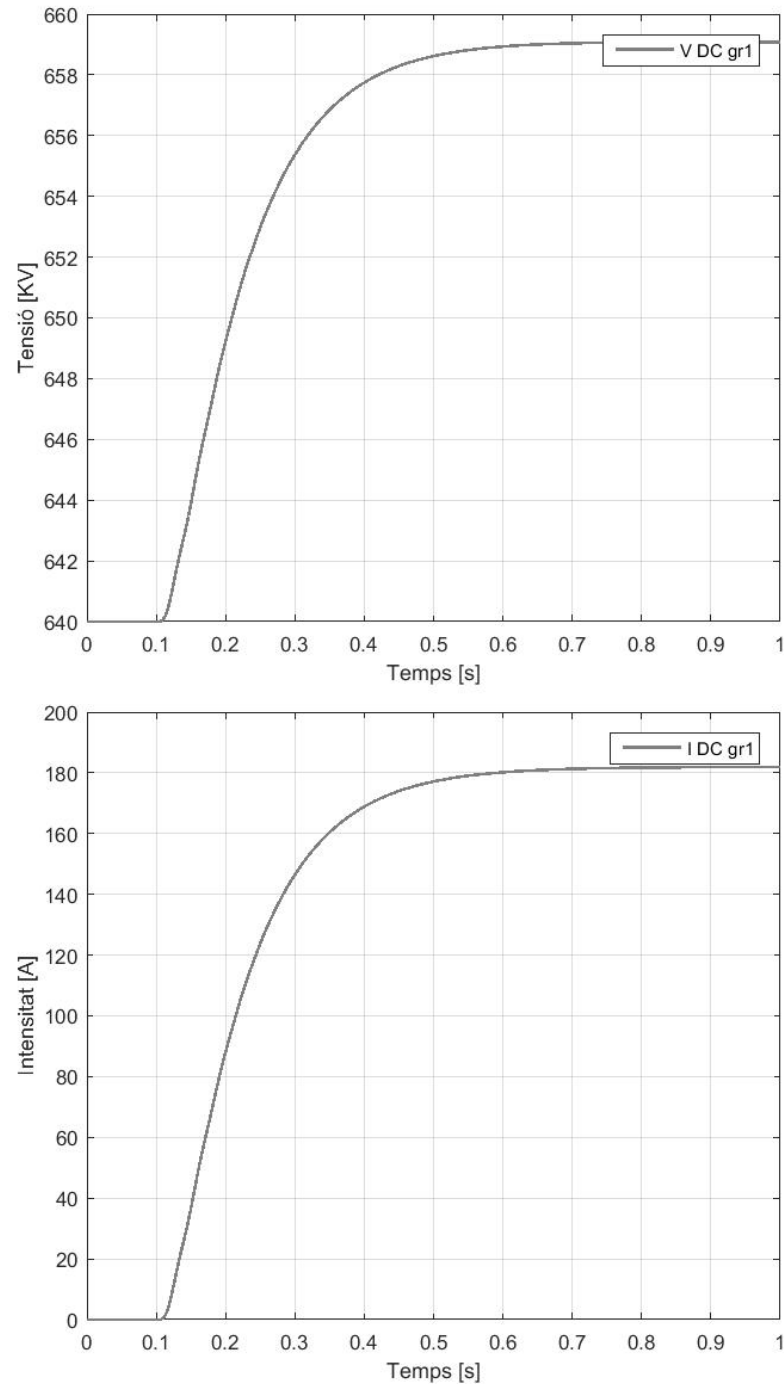
Per definició, els corrents i_d i i_d^* han de valer 0. Malgrat es poden observar algunes pertorbacions, es mantenen els seus valor molt propers al 0. Respecte les intensitats i_q i i_q^* anteriors, aquestes són totalment menyspreables.



Il·lustració 30 Comparació de les tensions v_{lq} i v_{ld}

Comentari sobre la il·lustració 30:

Pel que fa al gràfic superior de les tensions v_{lq} i v_{ld} de la xarxa elèctrica terrestre, els valors obtinguts són els esperats, degut a la injecció de potència per part del parc eòlic. Pel que fa al gràfic inferior, s'observen unes petites oscil·lacions entre els valors 261.3 i 261.6. Aquest fenomen respon just al moment de la injecció de la potència, on el sistema aconsegueix mantenir-se estable.

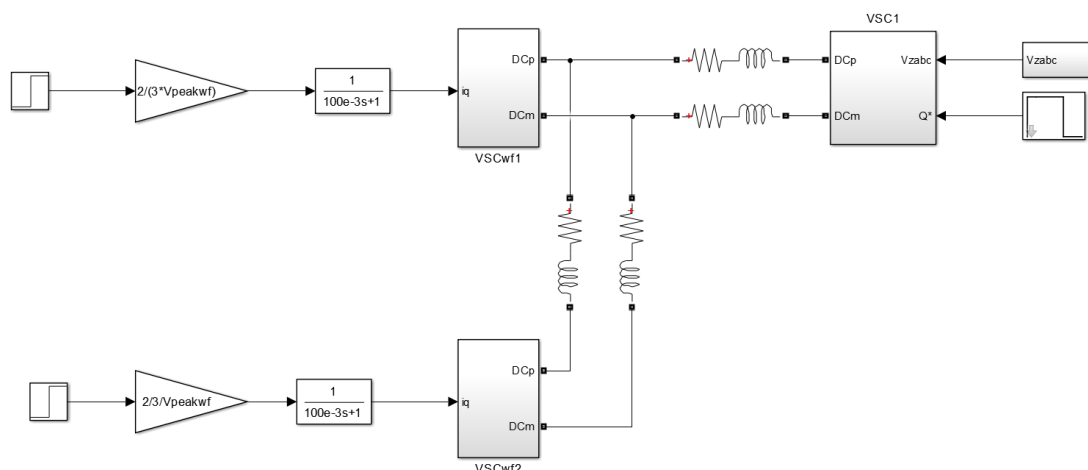
*II·l·lustració 31 Tensió i corrent continu*

Comentari sobre la il·lustració 31:

El valor de la tensió continua, V_{DC} , i el de la intensitat continua, I_{DC} , permeten calcular la potència injectada a la xarxa. Si multipliquem ambdós valors obtindrem una potència pràcticament idèntica a la injectada en la simulació

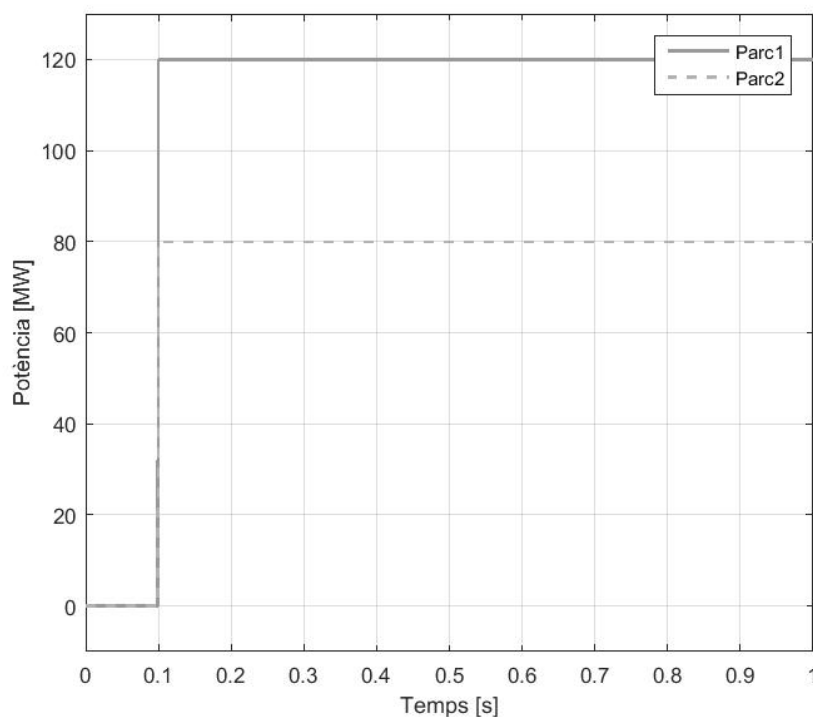
9.5. Configuració multiterminal 1

Per a la realització d'aquesta simulació s'ha considerat una distància entre convertidors de 150 km i una K_{droop1} de 6250 i una K_{droop2} de 20000

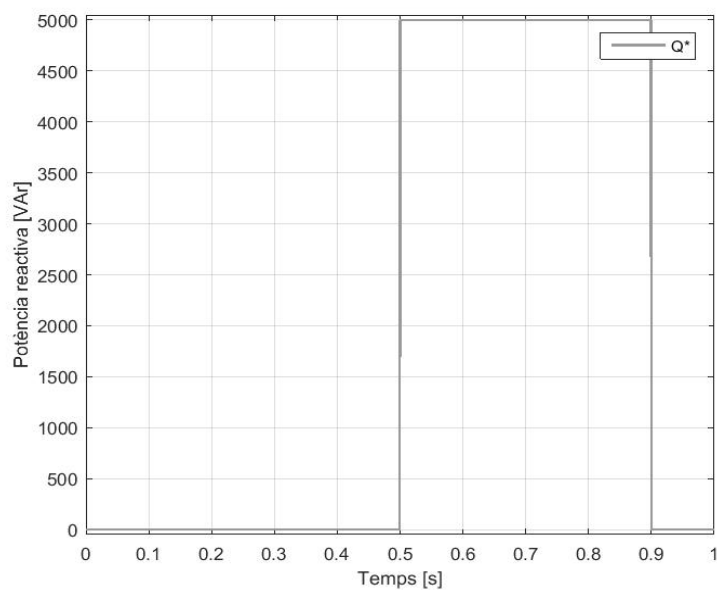


Il·lustració 32 Diagrama de blocs de la configuració multiterminal 1

9.5.1. Variables d'entrada

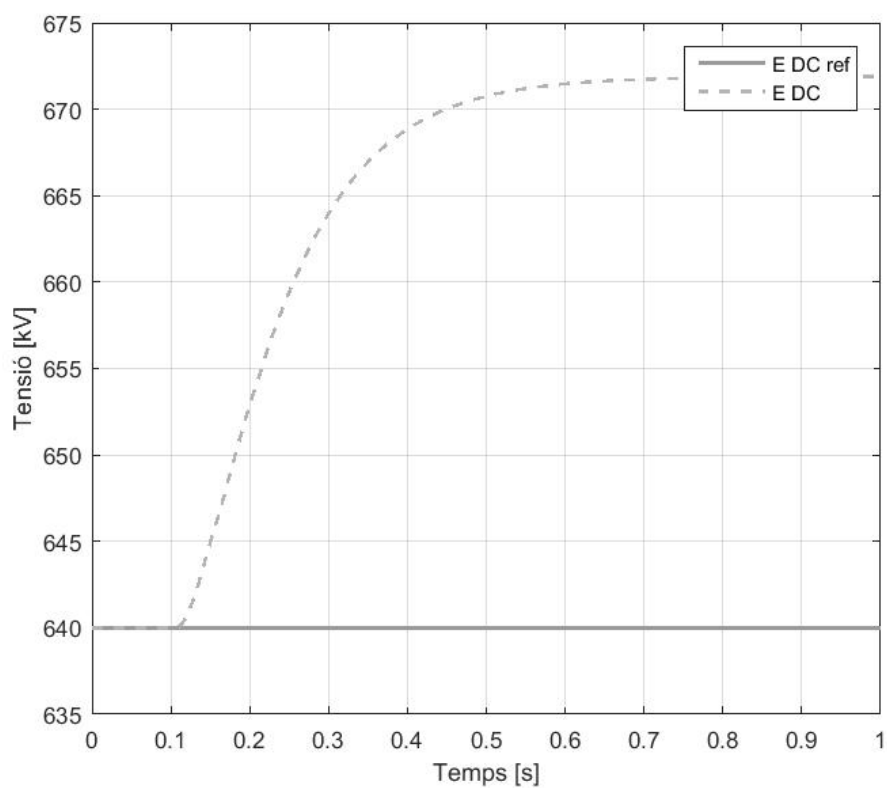


Il·lustració 33 Entrada gràfic per les potències Parc1 i Parc2

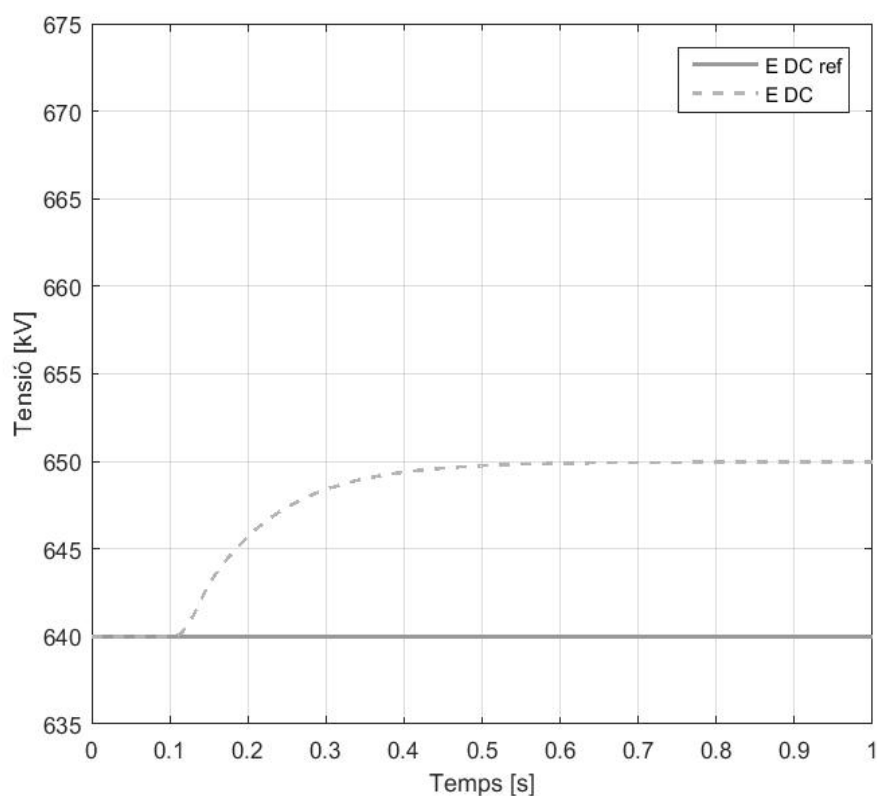


Il·lustració 34 Entrada esglaió per la variable Q^*

9.5.2. Resultats de la simulació multiterminal 1



Il·lustració 35 Comparació entre la tensió de referència i la obtinguda amb $K_{\text{droop}} = 6250$



II-lustració 36 Comparació entre la tensió de referència i la obtinguda amb $K_{droop} = 20000$

Comentari sobre les il·lustracions 35 i 36:

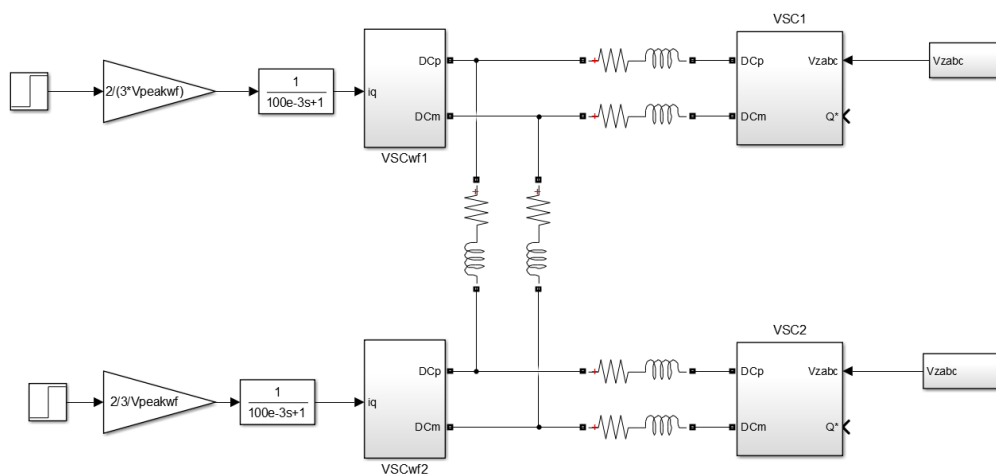
A partir d'aquesta simulació multiterminal, mantenint constant les potències d'entrada i variant únicament el valor de la constant K_{droop} , es pot observar com l'augment d'aquesta constant, redueix la diferència entre ambdues senyals i, per tant, l'error disminueix.

9.6. Configuració multiterminal 2

Per a la realització d'aquesta simulació s'ha considerat una distància entre convertidors de 150 km i els següents valors de K_{droop} :

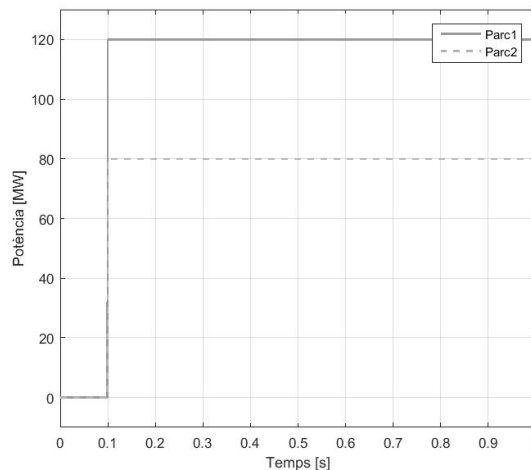
Taula 8 K_{droop} per a la simulació multiterminal 2

SIMULACIÓ	$K_{\text{DROOPVSC1}}$	$K_{\text{DROOPVSC2}}$
1	10000	10000
2	8000	12000
3	3000	17000



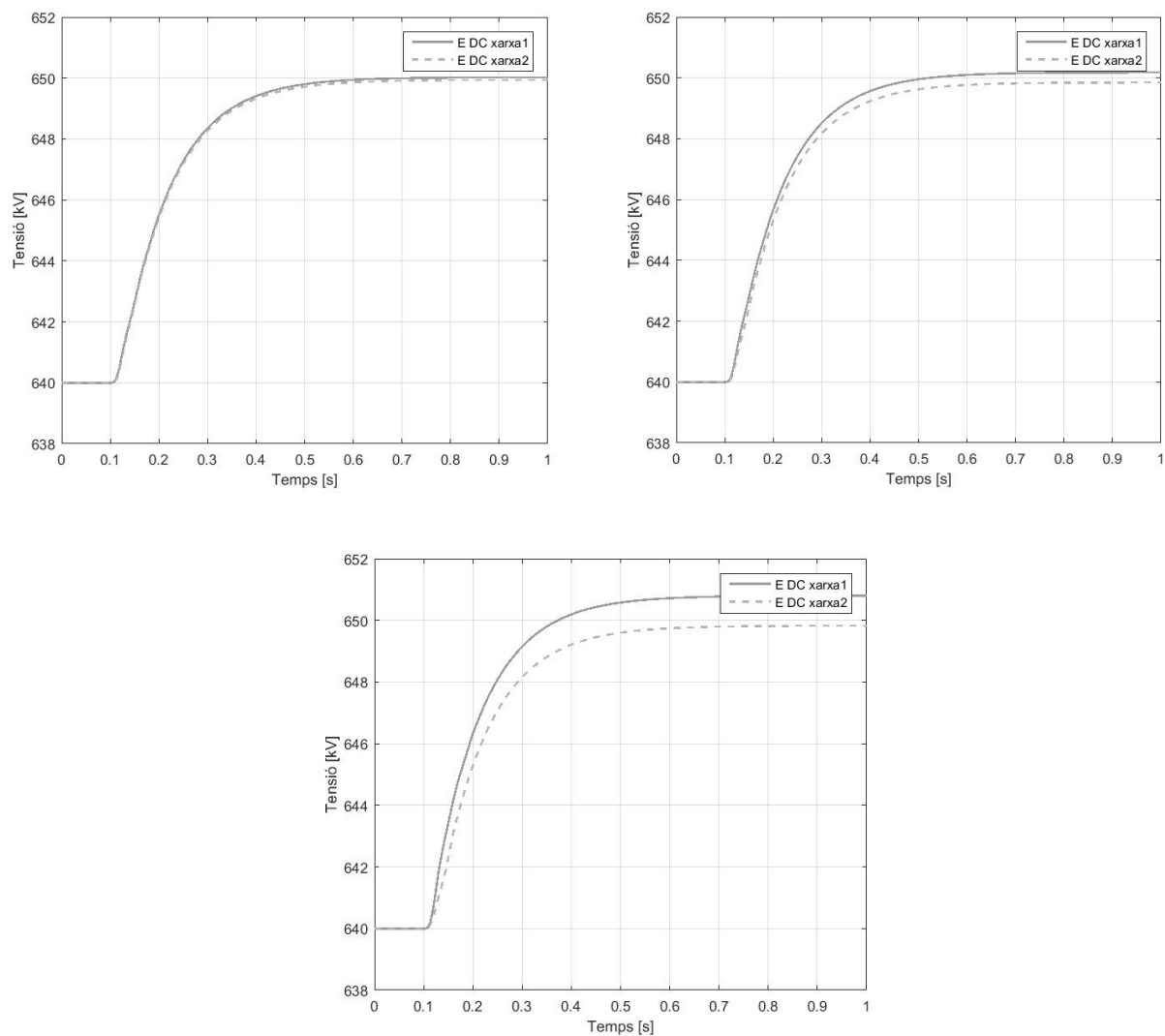
II·lustració 37 Diagrama de blocs de la configuració multiterminal 2

9.6.1. Variables d'entrada



II·lustració 38 Entrada gràf per les potències Parc1 i Parc2

9.6.2. Resultats de la simulació multiterminal 2



II·lustració 39 Comparació de les tensions DC al VSC1 i VSC2 per diferents Kdroop (gràfics ordenats segons simulació 1, 2, 3 de la Taula 8)

Conclusions

En aquest projecte s'ha presentat una metodologia per analitzar, modelitzar i simular una transmissió de potència real a través d'un software com el Matlab Simulink®. S'ha trobat que la separació per blocs principals, i dins que cada gran bloc la subdivisió en d'altres unitats més petites, ha estat efectiva a l'hora de dur a terme el projecte. D'aquesta forma, també s'han pogut estudiar els senyals de forma independent, fent un anàlisi més acurat.

Pel que fa a la metodologia seguida en les simulacions, s'ha cregut correcte analitzar un gran nombre de variables en un cas simple (configuració punt a punt) per entendre el funcionament de les senyals més importants. Un cop fet aquest pas, s'han pogut realitzar les simulacions amb sistemes multiterminal i s'ha pogut comprovar l'afectació directe i real del control *droop*.

Pensant en futurs projectes, una part interessant seria treballar amb un model de cable HVDC de tipus *pi en múltiples seccions* per obtenir una simulació més vertadera encara. Si es volgués seguir investigant, també es podria intentar millorar el model simulat al VSC per la banda de l'aerogenerador. En el present projecte, s'ha treballat aquest convertidor amb dues variables que han creat la xarxa del parc eòlic (*grid former*). Un control més avançat permetria dur a terme un anàlisi encara més dinàmic del sistema.

Agraïments

Deixant de banda la tercera persona, els formalismes i el rigor amb el que s'ha fet aquest projecte, em prenc la llibertat per agrair de la forma més sincera possible al meu professor Eduard Prieto la seva dedicació i tots els seus coneixements, els quals m'ha facilitat sempre que els he necessitat.

Moltes gràcies Edu.

Volia aprofitar per agrair també el suport de la meva família, dels meus amics i dels meus companys, els quals sempre m'han donat un cop de mà quan ho he necessitat.

A tots i totes,

Gràcies.

10. Annex A. Pressupost

El pressupost d'aquest projecte es pot separar en dos grans blocs. Per una banda hi ha les despeses relacionades amb la mà d'obra, i per una altra banda es poden comptabilitzar els costos informàtics que se n'han derivat.

10.1. Recursos humans

A la taula 9, es mostra el pressupost referent a la part dels recursos humans utilitzats per dur a terme aquest projecte.

Taula 9 Pressupost dels Recursos humans

Concepte	Preu/hora	Hores	Total
Investigació	20 €/h	125	2500 €
Simulació	20 €/h	125	2500 €
Redacció	15 €/h	75	1125 €
Total			6125 €

10.2. Recursos informàtics

A la taula 10, es mostra el pressupost referent a la part dels recursos informàtics utilitzats per dur a terme aquest projecte.

Taula 10 Pressupost dels Recursos informàtics

Concepte	Preu unitari	Unitats	Total
PC - Huawei	600 €	1	600 €
Llicència anual Matlab Simulink ®	800 €	1	800 €
Llicència anual Microsoft Office ®	120€	1	120 €
Total			1520 €

10.3.Pressupost global

A taula 11, es mostra el pressupost global dels recursos utilitzats per dur a terme aquest projecte.

Taula 11 Pressupost global

Concepte	Total
Recursos humans	6125 €
Costos informàtics	1520 €
Total (sense IVA)	7645 €
IVA 21%	1605,45 €
TOTAL	9250,45 €

Data: 18 de Gener de 2018

Signatura: Gerard Salmora

11. Annex B. Impacte ambiental

En aquest annex es tractarà l'impacte ambiental que es troba relacionat amb el sistema de transmissió HVDC estudiat al llarg del present projecte. Es tractarà l'impacte sobre el medi ambient en tres grans blocs: estudi previ, fase de construcció i funcionament, i fase de desmantellament. Val a dir que realitzar un estudi ambiental del sistema complert, tenint en compte totes les interaccions entre els diversos ecosistemes marins, resulta complicat, ja que són molts els elements que poden veure's afectats per la instal·lació d'una transmissió HVDC amb aerogeneradors [9]

11.1. Estudi previ d'impacte

Abans de dur a terme la instal·lació d'un parc eòlic, s'han de tenir en compte quina és la situació actual de l'entorn on es vulgui construir el parc.

11.1.1. Impacte sobre zones de pesca i navegació

En cas que la zona on es vulgui instal·lar el parc eòlic mostri una alta activitat pesquera, aquesta es veurà completament anul·lada, motiu pel qual s'haurien de fer front nous tràmits burocràtics degut a possibles queixes de les persones que duen a terme l'activitat de pesca.

La reducció de l'activitat de pesca podria ser beneficiosa pels ecosistemes afectats. Probablement, sense una pesca constant en la mateixa zona, els ecosistemes habitants podrien recuperar-se.

Pel que fa a la navegació, s'hauria de valorar si la construcció d'un nou parc entra en conflicte amb zones de navegació, per tal d'evitar interferències negatives amb les diferents activitats econòmiques que es duen a terme als litorals. Per tant s'hauran d'estudiar detalladament si els emplaçaments idonis per la construcció del parc eòlic marítim afecten a rutes habituals de tràfic marítim, zones de navegació aèria, etc. I en cas que així fos, estudiar rutes alternatives.

11.1.2. Impacte sobre l'ecosistema marí

La construcció de parcs eòlics marins haurà de respectar en mesura del possible la flora i la fauna en la seva ubicació. S'han d'avaluar quines són les conseqüències sobre els ecosistemes afectats i pal·liar-les per tal d'afectar el mínim possible l'entorn marí.

11.1.3. Impacte sobre el paisatge

En principi, un parc eòlic marí no té cap mena d'impacte sobre el paisatge, ja que es troba a

centenars de quilòmetres lluny de la costa, pel que és impossible la seva observació.

11.2. Construcció i funcionament del parc eòlic

En aquest apartat s'analitza com el parc eòlic afecta diferent factors durant la seva fase de construcció i també al llarg de la seva fase de funcionament. A la taula 12 queden resumits els punts més importants

Taula 12 Factors durant la fase de construcció i de manteniment del parc eòlic

Factor	Fase Construcció	Fase Funcionament
Fons marí	<ul style="list-style-type: none"> · Les cimentacions alteren el fons marí. · La instal·lació dels cables HVDC implica realitzar moviments de sòl. 	<ul style="list-style-type: none"> · Les estructures de subjecció, entre d'altres, alteren el fons marí de manera permanent.
Aigua	<ul style="list-style-type: none"> · Afectació degut als moviments de sòl previstos. 	<ul style="list-style-type: none"> · Durant les operacions de manteniment dels aerogeneradors, no es poden abocar residus tòxics a l'aigua.
Atmosfera	<ul style="list-style-type: none"> · La contaminació acústica serà elevada perquè es necessita de molta maquinària. 	<ul style="list-style-type: none"> · La contaminació acústica pot afectar a la flora i fauna propera. · No existeix contaminació per gasos nocius.
Paisatge	<ul style="list-style-type: none"> · El trànsit de la maquinària des de la costa fins a la ubicació del parc pot causar contaminació visual instantània. 	<ul style="list-style-type: none"> · No existeix contaminació visual.
Flora i fauna	<ul style="list-style-type: none"> · Es modificarà en certa mesura tant en l'indret on se situï el parc, com al llarg del recorregut dels cables HVDC. 	<ul style="list-style-type: none"> · Les aus són els animals més afectats degut al xoc que poden patir amb un aerogenerador.
Navegació marítima i	<ul style="list-style-type: none"> · En cas que hi hagi ports i aeroports propers, s'ha de tenir en compte la 	<ul style="list-style-type: none"> · Es podria necessitar la prohibició d'alguna ruta aèria de baixa alçada

aèria	ubicació precisa del parc, per evitar futurs problemes logístics.	per evitar incidents.
--------------	--	-----------------------

11.3.Desmantellament del parc eòlic

La vida útil d'un parc eòlic es situa al voltant dels 25 anys. El seu desmantellament no és una tasca que sigui especialment complicada. Els parcs eòlics van començar-se a construir a finals del segle passat. És evident que no existeix molta experiència pel que fa al seu desmantellament perquè la majoria dels que s'han construït encara rendeixen. De totes formes, aquest factor d'incertesa o novetat pel que fa al desmantellament d'un parc, no té perquè ser una fase problemàtica mediambientalment.

12. Annex C. Transformació de Park

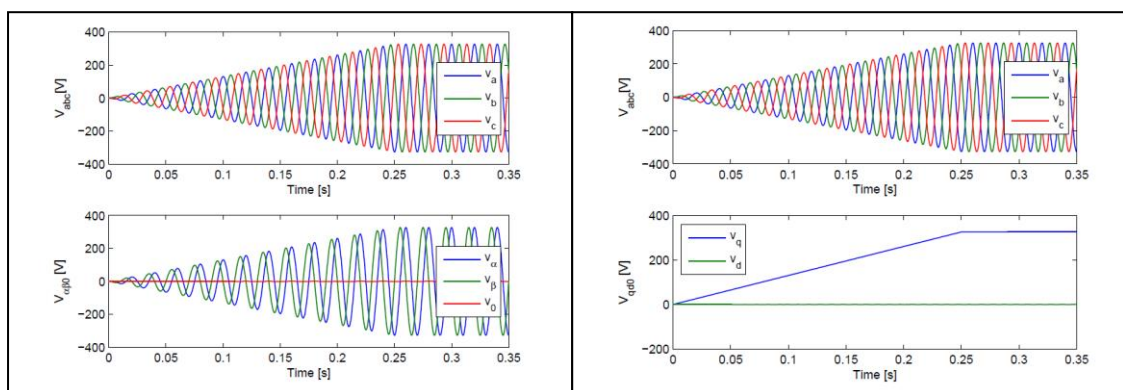
Treballar amb tensions i corrents trifàsics pot resultar molt complex i costós. És per això, que al llarg d'aquest projecte s'ha utilitzat una eina matemàtica que ha facilitat tots els estudis i càlculs: *La Transformació de Park*.

La problemàtica de món trifàsic rau en la seva naturalesa ondulatoria i, per tant, no constant. La *transformació de Park* permet canviar de referència les variables trifàsiques (tensions i corrents), fent que abandonin el seu comportament oscil·lant i que esdevinguin constants. Es diu que la referència natural trifàsica és la *referència abc*, mentre que la nova referència de Park és la *referència qd0*.

Val a dir, que existeix una transformació intermèdia entre la referència *abc* i la referència *qd0*: la referència $\alpha\beta 0$. Cronològicament, primer aparegué la *transformació de Clark*, la qual permeté el pas de *abc* a $\alpha\beta 0$, és a dir, d'una referència amb tres variables oscil·latòries a una referència amb dues variables oscil·latòries i una de nul·la. Seguidament, i aprofitant la *transformació de Clark*, es publicà la *transformació de Park*, la qual permeté el pas de $\alpha\beta 0$ a *qd0*, és a dir, d'una referència amb dues variables oscil·latòries i una de nul·la a una referència amb una variable constant i dues de nul·les.

Evidentment, aquestes transformacions són reversibles i existeixen els canvis de referència en direcció contrària a l'esmentada, fent les corresponents antitransformacions.

A la il·lustració 40, es mostra un exemple de la *transformació de Clark* i de la *transformació de Park* per a la mateixa variable en referència *abc*.



Il·lustració 40 Tensions en referència absoluta, $\alpha\beta 0$ i *qd0*, respectivament

12.1. Equacions i matriu de la transformació de Park

$$\{x_{qd0}\} = [T(\theta)]\{x_{abc}\} \quad (12.21)$$

$$\{x_{abc}\} = [T^{-1}(\theta)]\{x_{qd0}\} \quad (12.22)$$

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (12.23)$$

$$T^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (12.24)$$

12.2. Teoria de la potència instantània en el marc d'una referència síncrona

Per obtenir valors constants, l'angle emprat en la *transformació de Park* ha de ser el mateix que l'angle corresponent a la tensió de la xarxa elèctrica. Per tant, es diu que la *referència qd0* de Park és síncrona. Substituint l'angle θ per l'angle elèctric $\theta = \omega t + \phi_0$, i transformant les tensions i corrents de la *referència abc* a la *referència qd0*, es poden definir els següents fasors de tensió i corrent:

$$\underline{V^{qd}} = \frac{v_q - jv_d}{\sqrt{2}} \quad (12.25)$$

$$\underline{I^{qd}} = \frac{i_q - ji_d}{\sqrt{2}} \quad (12.26)$$

La potència del sistema trifàsic corresponent seria:

$$S = P + jQ = 3 \underline{V^{qd}} \underline{I^{qd*}} = 3 \left(\frac{v_q - jv_d}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{i_q - ji_d}{\sqrt{2}} \right) \quad (12.27)$$

Ordenant l'expressió obtinguda, es poden expressar els valors de la potència activa i reactiva de la següent forma:

$$P = \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d) \quad (12.28)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_q i_d + v_d i_q) \quad (12.29)$$

Considerant un correcte funcionament del *PLL* i, per tant, $v_d = 0$, s'obtenen les següents expressions més reduïdes:

$$P = \frac{3}{2} v_q i_q \quad (12.30)$$

$$Q = \frac{3}{2} v_q i_d \quad (12.31)$$

13. Annex D. Transformació de Clark

La matriu de la transformació de Clarke es pot obtenir a partir de la matriu de la transformació de Park tenint en compte que el valor de l'angle val 0.

Es considera que la velocitat amb la que gira aquesta nova referència és nul·la i, per tant, que l'angle és constant. Així, doncs, és pot particularitzar l'angle amb un valor nul, obtenint-se les següents equacions:

$$\{x_{\alpha\beta 0}\} = [T_{\alpha\beta 0}]\{x_{abc}\} \quad (13.32)$$

$$\{x_{abc}\} = [T_{\alpha\beta 0}^{-1}]\{x_{\alpha\beta 0}\} \quad (13.33)$$

$$T_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (13.34)$$

$$T_{\alpha\beta 0}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (13.35)$$

Bibliografia

- [1] D. Van Hertem, O. Gomis-Bellmunt, J. Liang, *HVDC Grids: for offshore and supergrid of the future*, Enviat per publicar el 12 de Gener de 2015.
- [2] Comissió Europea, *Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2001, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad*, Diario oficial de la Unión Europea, pàg. 33–40, Visitat al Gener 2018. [Online]. Disponible: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32001L0077>
- [3] Comissió Europea, Paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020, Unión Europea, Visitat al Gener 2018. [Online]. Disponible: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es
- [4] Comissió Europea, Marco sobre clima y energía para 2030, Unión Europea, Visitat al Gener 2018. [Online]. Disponible: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es
- [5] S. Gordon, *Supergrid to the rescue*, Power Engineer, vol. 20, no. 5, pàg. 30–33, oct.-nov. 2006
- [6] P. Buijs, D. Bekaert, S. Cole, D. Van Hertem, and R. Belmans, *Transmission investment problems in Europe: Going beyond standard solutions*, Energy Policy, vol. 39, no. 3, pàg. 1794–1801, 2011, Visitat al Gener 2011 [Online]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142151100022X>
- [7] O. Anaya, D. Campos, E. Lenymirko, G. Philip, *Offshore wind energy generation : control, protection, and integration to electrical systems*, Regne Unit, Wiley 2013
- [8] A. Egea-Alvarez, A. Junyent-Ferré, O. Gomis-Bellmunt, *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems*, Springer, Berlin, Heidelberg 2012.
- [9] Eduardo Prieto Araujo, *Anàlisi dinàmica de xarxes multiterminal HVDC-VSC per al transport d'energia elèctrica en corrent continu en parcs eòlics marins*, Barcelona 2012
- [10] Vrana, Yang, Jovcic, Dennetière, Jardini, Saad, *The CIGRE B4 DC Grid Test System*, Visitat al Gener 2018. [Online]. Disponible: http://b4.cigre.org/content/download/34038/1483266/version/1/file/CIGRE_B4_DC_Grid_Test_System_FINAL_corrected_version_with_Intro_V15.docx